

平成8年4月1日発行(毎月1回1日発行)

ISSN 1341-688X

Volume 1
No.4 1996

(社)日本鉄鋼協会会報

ふえらむ

Bulletin of

The Iron and Steel

Institute of Japan



社団法人 日本鉄鋼協会
The Iron and Steel Institute of Japan



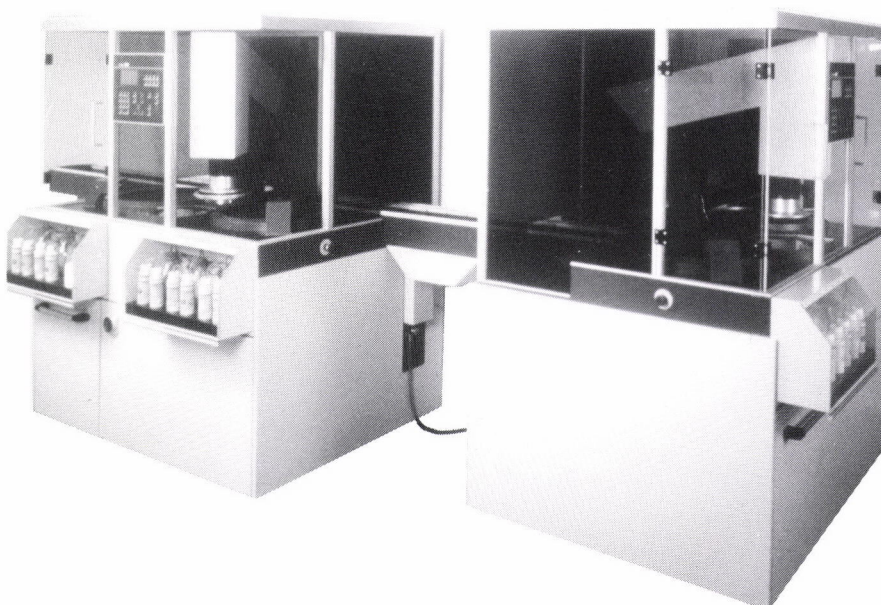
MAPS

Modular Automatic Preparation System

ストルアス 完全自動試料準備システム “マップス”

マップスの特長

- システムを目的に応じ個々に構成
- 完全な無人自動運転
- 優れた仕上面と高い経済性
- 堅牢な構造と高い信頼性
- パソコンによるシステムの制御と膨大なデータベース



システム構成要素

マップス試料準備モジュール：面出しステーション1台＋研磨／琢磨ステーション1台
または研磨／琢磨ステーション2台
洗滌、乾燥ステーション、搬送用腕
マイクロプロセッサ制御（試料板はアブラ機械と共用）

コンベヤー：送入用／送出用／移動用

循環冷却装置

研磨／琢磨砥粒供給装置

研削量測定装置

マップスマスター：パソコンソフト



15-0198

日本総代理店 **丸本工業株式会社**

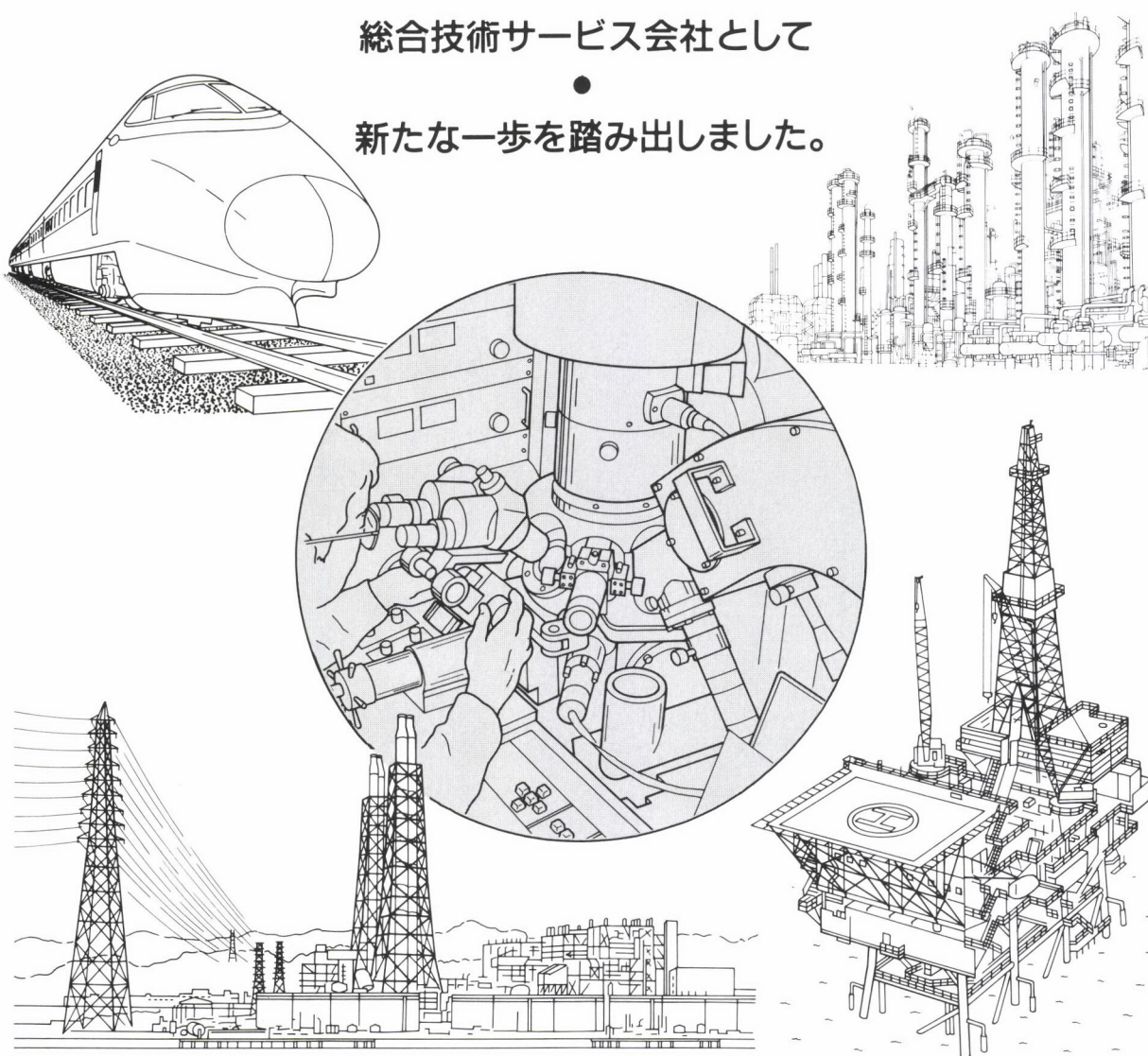
本 社 〒104 東京都中央区築地2丁目12番10号 ☎(03)3546-8051
ファクシミリ (03)3546-7980

まだまだ広がる テクノロジーの未来

住友金属工業株の永年の技術と経験の蓄積をバックにした

●
総合技術サービス会社として

●
新たな一歩を踏み出しました。



住友金属テクノロジー株式会社

(受託研究事業部)
(評価試験事業部)
(分析技術部)
(鹿島事業部)
(鉄道産機事業部)
(OCTG事業部)

本社 〒660 尼崎市扶桑町1番8号 TEL.06-489-5779
(尼崎) 〒660 尼崎市東向島西之町1番地 TEL.06-411-7683
(大阪) 〒554 大阪市此花区島屋5丁目1番109号 TEL.06-466-6153
〒314 茨城県鹿島郡鹿島町大字光3番地 TEL.0299-84-2557
〒554 大阪市此花区島屋5丁目1番109号 TEL.06-466-6176
〒660 尼崎市東海岸町21番地1号 TEL.06-409-1121

HORIBA

温度を制するものは、
炭素・硫黄分析を制す。

&

炭素・硫黄の正しい分析には、
「燃焼コントロール」は欠かせません。

「EMIA-820シリーズ」は、高周波誘導加熱方式ではじめて
「燃焼コントロール」を実現。加熱炉での、サンプルの燃焼
温度を適切な状態でキープし、ダストや未燃試料の発生
をおさえ高精度な分析を行います。また、はじめ低温
でサンプル表面の炭素を燃やし、その後高温で内部
の炭素を分析する「2段階方式」などは、分別定量
(形態別分析)への応用も可能にしています。
高い燃焼温度が迅速に得られるので、鉄をはじめ様々
なサンプルの分析にご使用いただける
「EMIA-820シリーズ」。

私たちが待ち望んでいた微量炭素・硫黄の高精度
分析、この1台が解決します。



鉄鋼・非鉄金属・新素材・セラミックスなどの品質チェックに、研究開発に。

炭素・硫黄分析装置

NEW

EMIA-820 シリーズ

- ppmレベルの微量分析から%レベルの通常分析までの超ワイドレンジ。●オートクリーナー機構(オプション)によるメンテナンスの自動・省力化。
- 加熱炉での指詰め防止機構など安全面の充実。●32ビットCPUと14インチCRT表示の高い操作性。

製品についてのお問い合わせは〔ホリバCSセンター〕まで
(祝祭日を除く月～金/9:00～12:00、13:00～17:00)

☎ 0120-37-6045

詳しい資料をご希望の方は、郵送またはFAXで(株)堀場製作所
広報室までご請求ください。FAX(075)321-6621

EMIA-820
資料請求券
ふえらむ 96.04

株式会社堀場製作所 本社 〒601 京都市南区吉祥院宮の東町2 TEL(075)313-8121 ●東京 TEL(03)3861-8231 ●名古屋 TEL(052)936-5781 ●大阪 TEL(06)390-8011 ●福岡 TEL(092)472-5041
日製産業株式会社 ●東京(03)3504-7211 ●札幌(011)221-7241 ●仙台(022)264-2219 ●埼玉(048)653-2341 ●広島(0298)23-7391 ●千葉(043)247-4151 ●A王子(0426)43-0080 ●横浜(045)451-5151 ●厚木(0462)96-6831 ●新潟(025)241-3011
●富山(0764)24-3386 ●静岡(0565)28-5191 ●名古屋(052)583-5854 ●京都(075)241-1591 ●大阪(06)366-2551 ●岡山(086)425-1316 ●広島(082)221-4514 ●高松(0878)62-3391 ●福岡(092)721-3501 ●沖縄(098)878-1311

ふえらむ

Vol.1 (1996) No.4

C O N T E N T S

目 次

長大橋に挑む IRON & STEEL

- 世界一の長大橋建設を支える鋼材の高強度化技術 2
チタンクラッド鋼板が長大橋の足元を激しい腐食環境から守る 8

話題のプロダクツ

- 日本の住宅に新しい風 スチールハウス時代到来 10

鉄の絶景

- 静寂の中の鉄ー京都 14

展 望

- 21世紀に向けて、電気事業の未来技術ートリレンマ解決への挑戦ー
(財)電力中央研究所人事部能力開発担当 井上正明 17

入門講座

- 鉄鋼材料編ー4 鉄はなぜさびるのか ー鉄の腐食化学入門ー
NKK総合材料技術研究所主席 松島巖 24
鉄鋼プロセス編ー3 鋼の育ちがきまるー凝固 ー結晶の生まれと成長過程ー
北海道大学名誉教授 高橋忠義 31

鉄の歴史 ③

- 遺物が語る古代日本の鉄
元新日本製鐵(株)先端技術研究所 佐々木稔 38

解説

- 鋼はどのように造られるかー製鋼プロセスの紹介ー
住友金属工業(株)総合技術研究所上席研究主幹 池田隆果 46

現場技術報告

- CCにおける溶鋼温度一定化、モールド内流動制御技術
新日本製鐵(株)名古屋製鉄所 木村秀明・岡崎照夫・上原彰夫
石井孝宣・後藤修・坂本康裕 55
100%水素高対流ベル型焼鈍炉(HCA)の操業と品質
日新製鋼(株)大阪製造所 村上寛・赤見大樹・相原博行 59
熱延仕上ミルロールバンディングモニタ(RBM)の開発
(株)神戸製鋼所 加古川製鉄所 東洵・福田誠・寺井克浩
吉武邦彦・石丸誠・岩井隆房 62

懸賞作文入賞作品紹介 ④

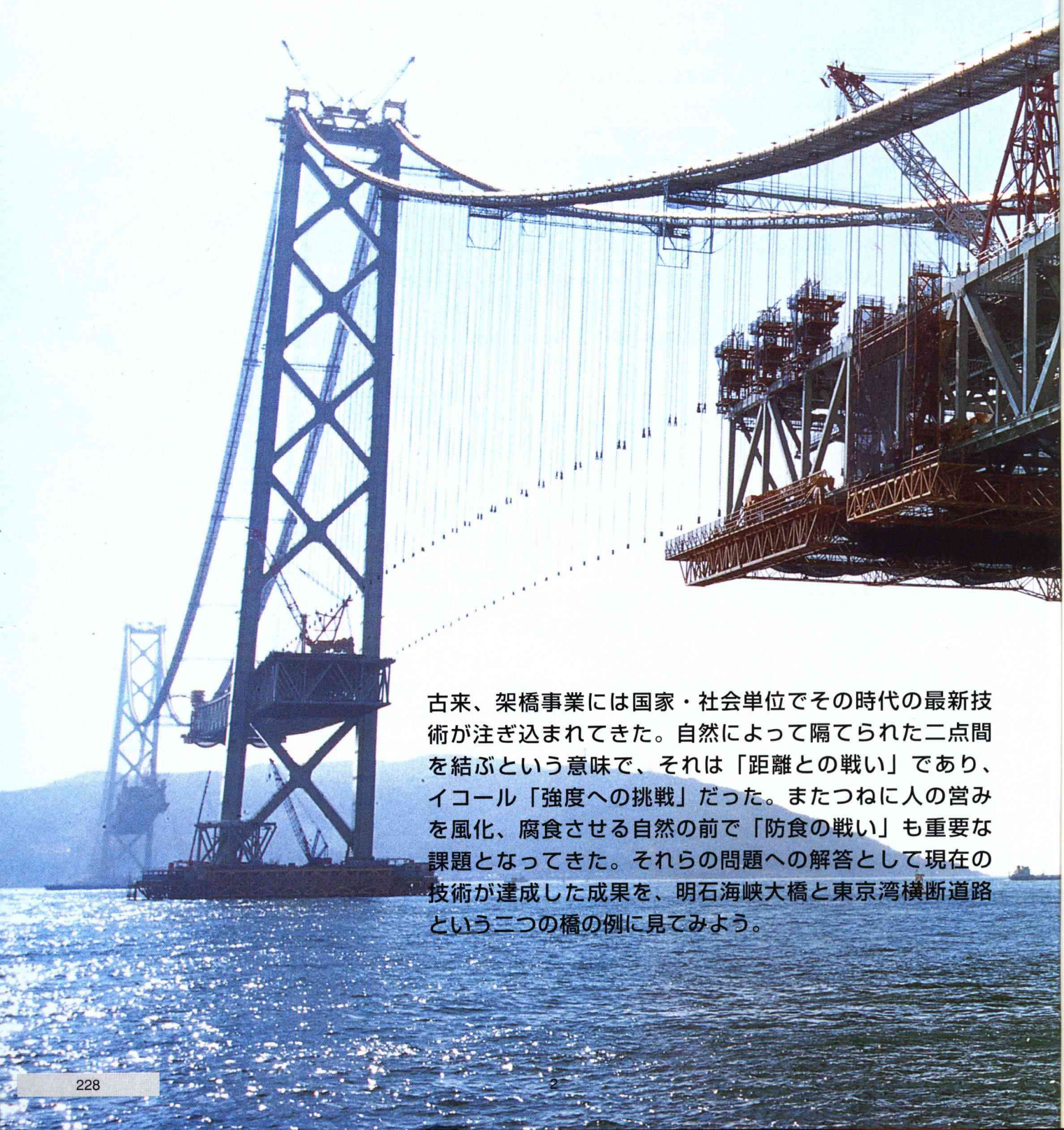
- 第1部(中学・高校生の部)2等賞 「鉄ー21世紀への夢」
石田沙織 66
第2部(大学生・一般の部)3等賞 「ニューメタルの勝利ー愛染鋼太郎の研究記録よりー」
河村瞭司 68

本会情報

- 72

IRON & STEEL

長大橋に挑む



古来、架橋事業には国家・社会単位でその時代の最新技術が注ぎ込まれてきた。自然によって隔てられた二点間を結ぶという意味で、それは「距離との戦い」であり、イコール「強度への挑戦」だった。またつねに人の営みを風化、腐食させる自然の前で「防食の戦い」も重要な課題となってきた。それらの問題への解答として現在の技術が達成した成果を、明石海峡大橋と東京湾横断道路という二つの橋の例に見てみよう。

世界一の長大橋建設を支える鋼材の高強度化技術

震災をこえて建設が進む明石海峡大橋

全長約4km (3,910m)、中央支間長約2km (1,990m)。神戸市と淡路島とをつなぐ明石海峡大橋は、完成すれば英国のハンバー橋を抜いて世界最大の吊り橋となる。そのすぐ足元を平成7年1月、マグニチュード7.2の兵庫県南部地震、別名阪神・淡路大地震が直撃した。調査の結果、明石海峡大橋を支えている地盤が動いていることがわかった。しかし橋の構造そのものには、大きな支障はなく、地盤が動いた分、橋の長さを約1.1m延長するという全体規模から見ればわずかな修正だけで、その後の進捗には影響が出ていないという。使用鋼材量約20万トン。今回は、平成9年度の完成に向けて工事が進むこの巨大な「鉄の芸術品」にスポットを当ててみる。

M7.2の衝撃にも揺らがなかった明石海峡大橋

「ああ、大丈夫だった、しっかりと立っていた……関係者の誰もがそう思ったのと違いますか」

本州四国連絡橋公団（以下本四公団）計画課長代理・塚本氏は、震災直後、無事に立っている明石海峡大橋を見た時のことをふりかえって語る。「(自宅では) 筆筒も冷蔵庫もみんな倒れてきよって、目茶目茶になりましたよ。明石海峡大橋は紀伊半島沖でマグニチュード8.5の大地震が起きた場合にも大丈夫のように設計されてはいましたが、正直なところ、現実にあれほどの地震が来るなど考えてもおらんかったですからねえ」

平成7年1月17日早朝、神戸で大地震発生とのニュースが日本中を震撼させたことはまだ記憶に新しい。震度7、マグニチュード7.2という大都市直下型地震。明石海峡付近の深さ10～20kmあたりが震源だという。

兵庫県南部地震は、まさに建設が進む明石海峡大橋の真下で起こったのだ。

震災当時、明石海峡大橋の進捗状況は、二本の主塔を経て

兩岸の着力点にケーブルがつながれた状態だった。主塔は全高約282.8m。東京タワーの高さが333mだから、そのアンテナのてっぺんから50mほど下の高さを直径1m 13cmほどのケーブルが2本走っている様を想像していただければ、イメージとしては近いだろう。ビルならば102階建てに匹敵する高さである。

「補剛桁の架設が始まっていなかったことが、幸いといえば、幸いだったかもしれません」(本四公団・帆足設計課長)。完成していればともかく、仮置部材・完全定着前の部材・架設機械などがあり、何らかの被害が出ていたかもしれないというわけだ。実際には、「震災対処に人員や機械類が総動員されて工事が約1カ月ほど停止したのと、地盤が動いて距離がわずかに伸びた分のサイズ修正のみで、遅れた分はその後の努力で十分取り戻すことができました」(前出・塚本課長代理) という。

日本が誇る世界一の橋は、マグニチュード7.2の地震が直撃しても揺らがなかったのである。



コンピュータグラフィックスによる完成予想図（完成予定は1998年）

■長大吊橋 世界ランキング

	中央支間長 (m)	国名	完成年
1 明石海峡大橋	1,990	日本	1998 (予定)
2 グレートベルト東道路橋	1,624	デンマーク	1998 (予定)
3 ハンバー橋	1,410	イギリス	1981
4 江陰長江公路大橋	1,385	中国	1997 (予定)
5 ツイン・マダ橋 *	1,377	香港	1997 (予定)
6 ベラザノ・ナローズ橋	1,298	アメリカ	1964
7 ゴールデン・ゲート橋	1,280	アメリカ	1937
8 ホグステン橋	1,210	スウェーデン	1998 (予定)
9 マキノ橋	1,158	アメリカ	1957
10 南備讃瀬戸大橋 *	1,100	日本	1988

*は道路鉄道併用橋

*強度は本来SI単位で表記すべきだが、橋梁用線材に関しては現在でも、たとえば「180キロ級」というように呼称されているので、文中では kgf/mm^2 の単位としている。



180 kgf/mm^2 の高張力ケーブル素材が、この壮大な計画を支えている（神戸側より撮影）

吊橋の要—ケーブル強度の飛躍的進歩

全長4km、スパン2kmという長大橋を可能にするためには、数々の技術的達成が必要とされたことはいうまでもない。鋼材という視点から見た場合、新たな高強度鋼の開発が求められることになった。こうした巨大建造物では、強度と靱性の双方を兼ね備え、できるだけ軽い構造で大きな荷重を支えられる鋼材が求められるのである。

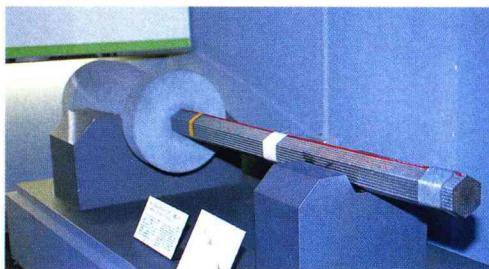
なかでも第一に特筆すべきは、高張力ケーブル素材の開発であろう。現状、明石海峡大橋は直径約1m 13cmのケーブル2本によって吊られているが、もし新たな高張力のケーブル素材が開発されていなければ、ケーブルは4本になっているはずだった。工期面からもコスト面からも、新たな高張力ケーブル素材の成功は、大きな意味があったのだ。

最終的に明石海峡大橋のケーブルに採用されたのは、180 kgf/mm^2 *の線材である。実はつい最近の瀬戸大橋までは160 kgf/mm^2 の線材が使われていた。しかし南備讃瀬戸大橋の8万6,000トン（上部構鋼材量）に比して、明石海峡大橋では20万トンと、ケタ違いの荷重がかかってくる。同じ強度のケーブル用鋼材を使えば、明石の場合、ケーブルは2本では足りなくなってしまうことが計算の結果、明らかになっていた。そこで公団では160 kgf/mm^2 のもので設計を検討する

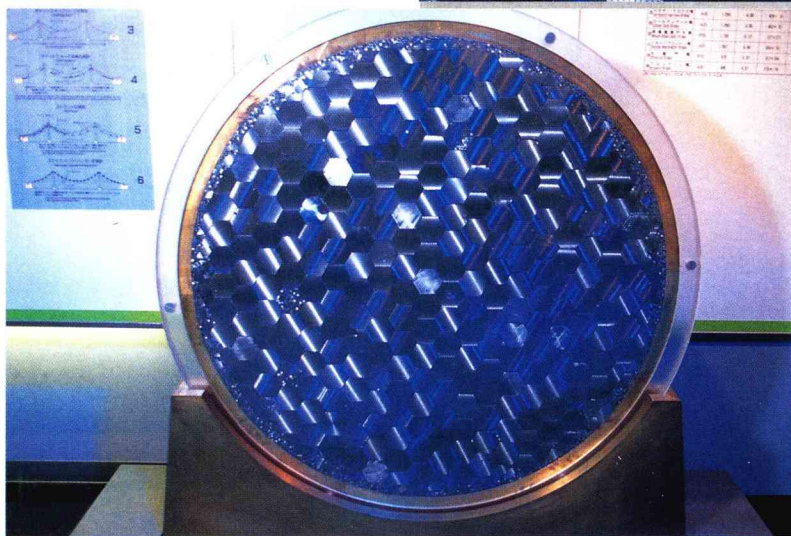
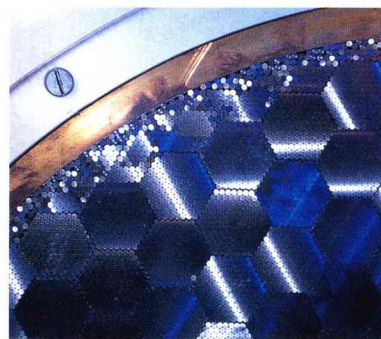
とともに、関係各社に依頼して180 kgf/mm^2 の線材の開発にも取り組むことになった。

「橋の長大化にともなって、死荷重も大きくなっていくという問題があります。つまり橋が大きくなればなるほど、自分自身を支えるために使われる力が増加する。従来のものを使用するとすれば、ケーブル断面寸法的な面からケーブルは4本にせざるをえなかったんです。しかし180 kgf/mm^2 のものができれば、2本でいける。工期からいっても、コストからいっても、2本にできればメリットが大きいわけです」（本四公団・平野設計課長）。

世界で初めてストレートワイヤー（よじりを与えていない真っ直ぐな鋼線を束ねたもの）をケーブルに使ったのは1883年のブルックリン橋（米）で、ワイヤー強度は112 kgf/mm^2 だった。その後、1903年のウィリアムズ・バーグ橋（米）では141 kgf/mm^2 、1909年のマンハッタン橋では148 kgf/mm^2 というように向上しているが、1931年にジョージ・ワシントン橋に155 kgf/mm^2 というケーブルが採用されて以来、50年以上にわたって大きな変化はなかった。88年に完成した瀬戸大橋の160 kgf/mm^2 もその延長上にある。ワイヤー強度の向上は、過去約100年間で48 kgf/mm^2 を向上させるのがやっとだったのである。



ストランドの実物大モデル／この六角の束290本でケーブル1本が構成される。実物は長さ約4km



ケーブル断面を見ると六角形のストランドと1本ずつの素線とがよくわかる。使われた素線は総延長で約30万km、地球7周半分に相当する長さである

本州四国連絡橋プロジェクト

本州と四国を橋で結ぼうという計画は現在3ルートからのアプローチがなされている。広島県と愛媛県を結ぶ「尾道・今治ルート」、6つの瀬戸大橋で知られる「児島・坂出ルート」、うず潮と淡路島をこえて明石海峡をひとまたぎにする「神戸・鳴門ルート」である。このうちすでに「児島・坂出」ルートは1988年に開通、本州・四国が陸続きになった。「神戸・鳴門ルート」も1998年（平成9年度）に明石海峡大橋の完成とともに開通する。残る「尾道・今治ルート」も平成10年度には開通予定。

それが瀬戸大橋から10年後の明石海峡大橋で一足飛びに20kgf/mm²も強くしようというのだから、それに相当する技術革新がなくてはならない。

開発に当たっては、これまでの高強度鋼開発のノウハウが総動員された。

1%のケイ素添加が高強度化を達成

高強度化のポイントのひとつは「冷間伸線加工」にある。吊橋用ワイヤーの場合、基本的にはダイスを通したいわゆる低温伸線によってフェライト（鉄全体）／セメンタイト（鉄の炭化物）組織の微細化を図るとともに結晶の方向をそろえることで強度を上げる。最初の丸棒の強度は110kgf/mm²、これを焼き入れして135kgf/mm²まで強化する。それを順次細くしながら強度を上げてゆき、素線にする。むろん引き抜きの回数が多いほどセメンタイト層の間隔は小さくなり、強度は上がってゆく。ただし元の材料からの減面率（断面積の減少率）は80%くらいが限度だから、12mmの丸棒から約5mmのワイヤーへと段階を追って伸線していくのがせいぜいである。またここまでの工程はすでに従来からの当たり前の技術であって、これだけでは180kgf/mm²は達成できない。そこでふたつめとして「材料の成分調整」によって原材料そ

もののセメンタイト層の間隔を小さくすることやフェライトの強度を上げることが検討された。合金設計原理の応用から、この目的にはケイ素の添加が効果的であることがわかり、これを採用した。同時にこのようにして得られた金属組織の特性をできるかぎり生かすために、製鋼の工程で不純物の結晶を5～10ミクロン以下に抑える技術も開発された。

しかしこうして強化が図られた素線用鋼材にも、もうひとつクリアすべき課題があった。素線に溶融亜鉛メッキをほどこす際に発生する強度低下の問題である。

亜鉛メッキは防食には不可欠な工程である。だが溶かした亜鉛プールに鋼材をくぐらせる際、層状に分布しているセメンタイトが分断されてしまい、強度が大きく低下してしまうことがわかっていった。ようやく得られた強度が、メッキのために失われるのは惜しい。しかし亜鉛メッキを省略すると耐食性が低下する。

この問題は研究の結果、さらにケイ素を加えることでセメンタイトの分断が起きにくくなることを見出だされ、解決した。その結果をふまえ明石海峡大橋の素線ではケイ素の添加量を1%（瀬戸大橋では0.2%）にまで引き上げたのである。

数々の課題をクリアーすることでようやく180kgf/mm²という世界最強の吊橋用ワイヤー素線が誕生した。明石海峡を



主塔を上から見下ろす。左右は吊り下げられたハンガーロープ

用途別に見た鋼材の強度

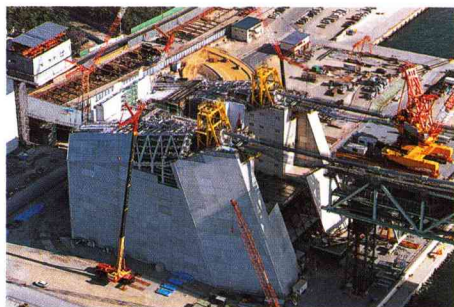
	(kgf/mm ²)
明石海峡大橋のケーブル素線	180
一般建築・土木用	30～60
自動車・船舶用	35～60
原子炉圧力容器用	50～90
深海用耐圧殻用	100～170
ロケット・航空機用脚用	130～270



290本のストランドを圧縮して丸い断面に仕上げるスクイジング・マシン。大震災が襲ったのは、この工程に入った時だった



1本にまとめられたケーブル。さらに被覆と塗装による防食が施されて完成する。下にみえる木の部分はキャット・ウォークと呼ばれる足場



ケーブルによって引っ張りに変えられた橋の重量を陸上でしっかりと支えるアンカレッジ。ケーブルは290本のストランド単位で固定されている



本四公団 第一建設局
設計課長
帆足 博明氏



本四公団 第一建設局
建設第一課長
平野 茂氏

ひとまたぎにする全長4kmの巨大構造物を、ミクロの技術が支えたのである。

こうして開発されたハイテン・ワイヤー（直径5.23mm）は、127本を束にまとめたストランドとよばれる単位で施工にまわされた。ブルックリン橋以来、吊橋のワイヤー張り渡しはリールを使って1本ずつ渡していくエア・スピニング（AS）工法が多く採用されてきたが、これはとんでもなく時間と人手を要する作業である。そこで日本では風に対する強さや施工スピード、人員が少なくすむことなどを考慮し、大規模な吊橋としては国内初の関門橋以来、ストランド単位での施工方法が採用されてきたという経緯がある。この方法は素線を工場であらかじめ束にまとめておくところからプレハブ・ストランド（PS）工法と呼ばれる。

ストランドの素線数は橋の規模によって異なるが、明石海峡大橋の場合は127本。数が半端なのは断面を正六角形にするためだ。この六角を290ストランドに集めて最終的に直径約1.3mの丸く太い断面にまとめあげ、スクイジングマシンと呼ばれる機械で圧力をかけてしっかりとした左右各1本のケーブルに仕立てていく。ハイテンワイヤーのおかげで2本におさまったケーブルだが、素線数にして約37,000本、1本ずつつないでいけば地球を7周半するほどの鋼線が使われている。

ワイヤーは、それぞれのストランドごとにアンカーレイジとよばれる兩岸の土台に固定する。橋の全荷重がケーブルを伝わって「引っ張り」に変えられ、アンカーレイジがその張力を支えることで、この巨大な鉄の塊が宙に吊り上げられているのである。

強度と溶接性の高度な両立が求められた桁用鋼材

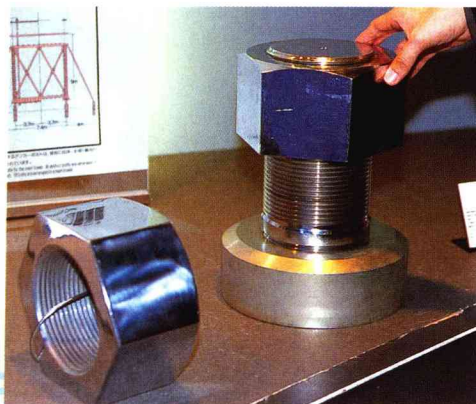
死荷重を軽減するうえで、ケーブルに次いで重要なのが補剛桁用の鋼材である。吊り橋に用いられる桁は、橋に剛性を持たせる役割を担っているため補剛桁と呼ばれる。吊橋だからといってこれほどの長大橋で、車が通ったり多少の風が吹いたくらいでゆらゆらと揺れるというようなことはあってはならないわけで、そのための安定した剛性が補剛桁によって確保されているのである。

ケーブル同様に軽く強くという要請からここでも高張力鋼が使用された。補剛桁の形式は施工性、耐風安定性などを考慮検討した結果、伝統的なトラス式が採用された。溶接で箱断面に組立てた部材を三角形の骨組みでつないでいくおなじみの方法である。

このトラス式補剛桁にはSM490YやSM570（数字はMPa（SI単位）で表した強度）といった高張力鋼が主として使われた。のみならず、主構上下弦材の一部にはHT

長大橋に吊橋形式が採用される理由

たとえば、1本のストローを手にとって両方から押してみると簡単に折れ曲がってしまうはずだ。これが鋼材という「座屈」に当たる。逆に同じストローを引っ張ってみると、引き伸ばしたり、引き切ったりするには相当な力が必要になる。引っ張りでは「座屈」という構造上の不安定要素は現れず、材料の持つ本来の強度を十分に生かすことができる。つまり軽く強く作りたい構造物では引張力を生かすことが有効というわけだ。この引張力によって重量を支える構造が吊橋である。



主塔に使われる高力ボルト。さすがに大きい



主塔にもSM570、SM490Y、SM400といった高強度鋼材が使用されている。鋼材の重ね面どうしはメタルタッチ（金属面どうしがピッタリと接触している状態で、本四公団の基準では隙間0.04mm以下）が94%以上という高度な加工技術によって仕上げられている。また揺れを緩和するため主塔のところどころには特殊な制振装置が組み込まれている

（ハイテン）690、HT780といった高強度の予熱低減型鋼が採用されている。これらはJIS規格にはない新開発の鋼材だ。瀬戸大橋ではSM580が使用されたが、明石海峡大橋では、さらに既存のスペックの枠をこえた高度な溶接用鋼材の開発が求められたのである。

開発に際して求められたのは、可能な極限まで溶接割れ感受性を下げるとともに、溶接時の予熱を下げるということだった。

「一般に強度を出すためには炭素を混ぜればいいわけですが、炭素が多くなると靱性が落ち、溶接割れが起きやすくなる。強度も出せて、溶接性も確保するにはどうすればいいのかが課題になったわけです。

従来は溶接の時に100～120℃という高い温度で鋼材の予熱をしなければなりませんでした。しかしそれだけ高い温度で予熱するということは、作業性が悪くなり、温度による変形も大きく、品質管理も難しくなる。せめて予熱を50℃程度に抑えられないかということで検討を進めました」（前出・平野課長）

この課題を解決するために研究を進めた結果、2通りの方法が見出だされた。

ひとつは1%弱程度の銅を添加する方法によって、炭素の替りに銅で鋼材の強度を出そうというものである。

「従来、鋼材の中に溶け込んだ銅というのは耐候性の向上への効果以外は悪い影響をおよぼすと考えられてきたんですが、それが逆に強度と溶接性を両立するのに効果があることがわかったわけです」（前出・帆足課長）

また、もうひとつの方法として、添加成分をコントロールするとともに適切な焼き入れをする方法も見いだされた。これは添加するボロン、チッ素、炭素、ニッケルの量を調整して靱性を確保する一方、軟化を抑えるためにニオブ、バナジウムを添加し、高強度と溶接性を両立させたものだ。こうした高強度鋼の開発が、世界一の長大橋建設を陰から支えているのである。

阪神・淡路大震災によって、耐震設計の建築物や高速道路が倒れ、東海道・山陽新幹線の路線が崩れた。だがそうした現実をかたくなに拒絶するかのように、明石海峡大橋は敢然としてそびえ立っている。完成まであと約2年。復興を遂げようとする神戸の街とともに、世界一の長大橋は、もうすぐ産声を上げようとしている。

〔取材協力：（社）本州四国連絡橋公団〕

チタンクラッド鋼板が 長大橋の足元を激しい腐食環境から守る 東京湾横断道路に使われた「飛沫・干満帯」防食の技術

橋脚の水打ち際は、激しい腐食環境にさらされる。「飛沫・干満帯」と呼ばれるこの部分の防食は、鋼製橋脚を採用する際の重要ポイントである。平成9年度の開通を目指して工事が進む東京湾横断道路では、この部分にチタン防食を取り入れることに成功した。大規模土木構造物では、構造物自体の耐用年数の基準として100年という数字を設定している。チタン防食なら100年間以上の長期間、防食効果を維持することが可能だと考えられている。世界初といわれるその成果に着目してみよう。



南側から見た東京湾横断道路・橋梁部分（建設中）。左手がトンネルへと通じる木更津人工島、右手が木更津市側

世界初／チタンクラッド鋼板による100年防食

かつて日本武尊が東国遠征の折り、三浦半島から房総へ渡ろうとして大しけに合い、愛妃・弟橘姫おとたちばなひめが海の神の怒りを鎮めるために自ら身を投げて一行を守ったという話が記紀の記述にある。悲しみにくれた日本武尊は辿り着いた岸边に立ちつくしてそこを離れようとせず、そのためその地は「君去らず」と呼ばれるようになったという。

その木更津から東京湾へ向けて、今ひとすじの道が延びる。道は約5kmほど海の上を走り、やがてなだらかなカーブを描きながら海中にすっぽりと飲み込まれていく。そこから川崎までは約10kmのトンネルだ。この道をゆけば、日本武尊と弟橘姫おとたちばなひめの別離の舞台になった海を、約12分足らずで走り抜けてしまうことができる。

延長約15km、木更津―川崎間をつなぎ、平成9年度開通を目標に工事が進められている東京湾横断道路。海上に出ている橋梁部分は、橋脚、桁ともに流れるような曲線が印象的である。

この東京湾横断道路の橋梁部分の沖合部橋脚12基に、鋼製橋脚が採用されている。

あらかじめ工場で製作できる鋼製橋脚は、現場での型枠・

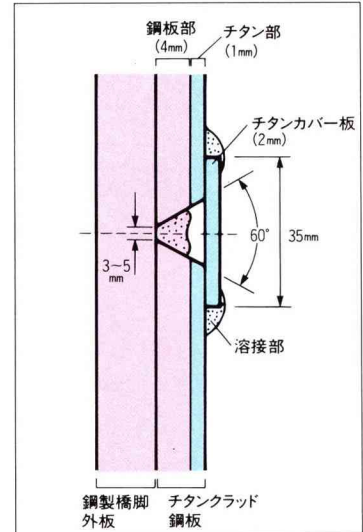
コンクリート打設作業を要するRCに比べ大幅な工期短縮が可能である。しかし問題になるのが浸食・風化作用の最も激しい波打ち際の部分、いわゆる「飛沫・干満帯」の防食だ。「海水による浸食」と「乾湿の繰り返し」という激しい腐食環境にさらされるこの部分の鋼材をどう保護していくか。そこが鋼製橋脚を使用するにあたってのネックとなってきた。

東京湾横断道路では、この部分に世界発のチタン防食を採用することで半永久的といってい防食効果を得ることに成功したのである。

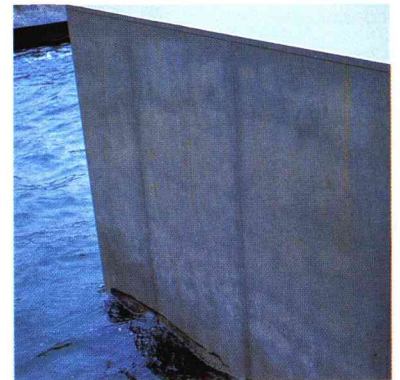
海水に対しては白金に次いで防食性が高いといわれるチタンだが、これまではコスト面での障害が大きく、異種金属接触による腐食進行や鋼材との溶接の難しさなど、扱いづらさも手伝って、土木分野ではごく限られた部分にしか使えなかった。ところが、新たな圧延技術の開発により、低コストのチタンクラッド鋼薄板が実現し、防食被覆周辺技術の開発もともなって、橋脚防食にも使用が可能になった。今後はさまざまな海洋土木分野でも、このチタンによる防食が活躍することが期待されている。



景観との調和を配慮し、曲線にこだわってデザインされたという鋼製橋脚（設置直後）



チタンクラッド鋼板の溶接継ぎ目部
（上から見たところ）



橋脚のチタン・クラッド防食部

チタン・チタン／鋼材・鋼材の溶接で問題点をクリアー

きわめて防食効果の高いチタンだが、鋼製橋脚用のカバーとして使うには、前述のような解決しなくてはならない大きな問題が2つほどあった。

第一には、異種金属の接触による腐食進行の問題である。海水を媒介にして2種類の金属が接触していると、電位差による電食で、急速に一方の腐食が進んでしまう。これは、すでに一般的になっているアルミ合金電極による電気防食で電位差をゼロにして溶け込みをなくすことによってクリアすることができた。

第二には、チタンと鋼を溶接する場合、溶接がしにくいうえ、溶接部分が極度に脆化し、橋脚そのものの強度に悪影響をおよぼしてしまうという問題があった。

そこで開発されたのが、熱間圧延によって1mmのチタン板と4mmの鋼板を圧着させたチタンクラッド鋼板だった。

「溶接はクラッド鋼板の鋼材部分と橋脚の鋼材とで行えば、強度低下を抑えられます。ただしクラッド鋼板はせいぜい幅1mくらいのものですから、これを短冊状に切断し橋脚の周囲にはり巡らしていくわけです。そうすると当然カバーの鋼板どうしの継ぎ目ができますね。だからこの上からチタンの

細いカバーをかぶせ、チタンとチタンを溶接します。この方法なら強度を落とさずに完璧にカバーができるというわけです」（東京湾横断道路 技術部・吉田課長）

鋼材は鋼材で、チタンはチタンで溶接を行うという発想である。チタンクラッド鋼板の特性をうまく利用するための方法といえるだろう。

東京湾横断道路は、設計にあたって周囲の景観との調和を重視した。そのため桁や橋脚部分にはなめらかな曲線が多用されている。橋脚ではY字のスマートな曲線が意図的に強調されている。このデザインをこわさずに防食を行ううえで、コンクリートにたよらないこの防食方法はきわめて有効だった。

「チタンを使わなければ、コンクリートを巻くとか、錆しりを大きく取るとかしなくてはならなかったでしょうね。そうすれば、橋脚がもっと太ったりして、現状のようななめらかな曲線は出せなかったかもしれません」（前出・吉田課長）

チタンクラッド鋼板の登場は、海中構造物に鋼材を使っていくうえでのひとつのエポックになると考えられる。今後の新たな採用が楽しい技術である。

【取材協力：東京湾横断道路（株）】

話題の
PRODUCT

プロダクツ

スチールハウス



日本の住宅に新しい風 スチールハウス時代到来

躯体を鋼材で構成するスチール版2×4住宅、それがスチールハウスだ。

アメリカで急激にシェアを伸ばしているこの新しい工法が

日本の住宅業界でも大きな注目を集めている。

国内への普及を目指して、現在さまざまなアプローチが進められている。

鋼材の一大マーケットとなる可能性を秘めて、いま新しい風が吹こうとしている。



NAHBにおけるデモンストレーションスチールハウス

スチールハウスの規定 (「スチールハウス建築物の性能評定・評価基準」日本建築センターより抜粋)

〔スチールハウスの定義〕

板厚 0.8mm以上 2.3mm未満の防錆処理された冷延鋼板を主要構造部材とし、ドリリングタッピンねじ等で接合して組立てた3階以下の住宅

〔適用範囲と制限事項〕

1. 階数：3階以下
2. 規模（建築面積、述べ面積の上限と下限の規定）：500m²以内
3. 用途：1階店舗併用を含む住宅
4. 立地条件：荷重外力が設定できること、また、腐食環境の条件も設定のこと
5. プランの自由度：システムを完備したフリープランから限定プランまで各種の条件を設定
6. 資材の種類と品質：構造用鋼材、壁材、床材、屋根材、接合材（ドリリングタッピンねじ等の、品質が保証される製品で、原則として規格品（国内外を問わない）を用い、その規格を明記する。
7. 設計者：設計要綱を熟知した1級建築士（より高度な設計となる場合はさらなる限定）。ただし、300m²以下の場合には2級建築士でもよい。
8. 施工者：設計要綱を熟知した管理者と必要な技能を有する技能者を保有する施工者（施工要領書、それを用いた教育システム）

不安定な木材供給から

スチールの人気が高まるアメリカ

最近、「地震に強い住宅」ということで、改めて2×4（ツーバイフォー）住宅が評価されている。アメリカからやってきたこの木造住宅は、2インチ×4インチの木材をフレームに使用し、建て方が合理的、耐久性にすぐれるなどの理由から、昭和49年（1974年）に日本に導入されて以来、着実に建設戸数を伸ばしてきた。

そしていま、同じように海外での実績を引っ提げて、日本の住宅業界に登場したのがスチールハウスである。スチールハウスは、木造2×4工法の柱や梁などの躯体構成材を鋼材に置き換えた工法で、すでにアメリカやオーストラリアなどでは多くの施工例がある。

なかでも最も急速な普及を見せているのがアメリカだ。アメリカでは、すでに1928年に初めてのスチールハウスが登場しているが、当時は競合となる木材が安価だったこと、鋼材の供給体制が不備だったこと、躯体構造以外のすべてをスチール化しようとしたこと、などの問題点から普及するまでにはいかなかった。しかし60年代になると、木材価格の変動や環境保護の立場からの森林伐採抑制など、材料代替の社会的要請が徐々に高まった。この一つの回答として、脚光を浴びたのがスチールハウスであり、とくに92年にクリントン大統領令による国有林の伐採禁止令は、結果的にスチールハウスが増加する大きなきっかけとなった。

AISI（American Iron and Steel Institute, 全米鉄鋼協会）によれば、1992年に全米で500戸程度だったスチールハウスの供給は、93年は1万5千戸、94年は4万戸、95年は7万5千戸を越えるといわれる勢いである。全米の1年間の住宅着工戸数が約100万戸であることを考えれば、またたくまに1割に達しようというこの増加ぶりは驚きである。しかも一説では、97年には25万戸、2010年には全米シェア75%という予測さえ出されている。

またオーストラリアでも、94年には住宅着工戸数年間約10万戸のうち約7%がスチールハウスとなっている。このほかカナダ、フランス、スウェーデンなどでも増加しつつあり、この傾向は当分世界中で続くものと思われる。

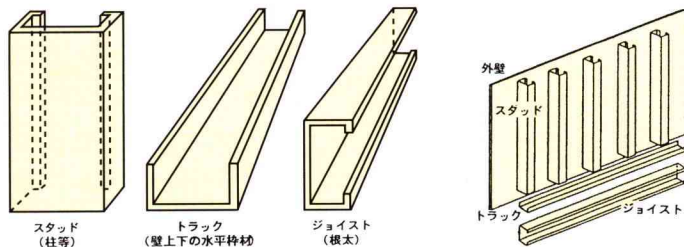
環境に適合、耐震性にもすぐれたスチールハウス

今までの住宅（おもに木造）と比較した場合のスチールハウスの特長について、全米規模の建設業および部品製造業の団体であるNAHB（全米住宅協会）では次のような点を挙げている。

スチールハウスの材料例

1. 耐久性、耐食性にすぐれる溶融亜鉛メッキ鋼板の薄板（0.8～2.3mm）を使用。
強度クラスは 400～500N/m² が標準。

2. ロールフォーミングでC形鋼に加工（2×4）
スタッド（柱等）
トラック（壁上下の水平枠材）
ジョイスト（根太）



日本は欧米に比べ地震や台風が多く、構造強度に関して厳しい基準が求められる。そこで鋼材倶楽部では平成6年度からスチールハウスの構造、耐久性に関する研究を進めている。
(写真)
面内せん断試験、圧縮試験のようす

1. 鋼材は工業製品であり、品質が一定である。
(木材のように白蟻、腐食、乾燥による反りなどの問題がない)
2. 耐久性にすぐれる。
3. 価格が安定している。
4. クレームが少ない。
(木造のように乾燥収縮によるクレームが生じない)
5. 燃えない。
(アメリカでは鋼材は木材に比べ40%も火災保険料が少ない)
6. 軽いので、施工、運搬がしやすい。
7. リサイクルできる。

またライフサイクルアセスメントの視点からは、IISI第一回セミナー「Steel in Housing」1995において、次のような発表がなされており、資源の消費量、生態系の破壊、製造上のエネルギー消費の点から、総合的にスチールハウスが有利であると言っている。

[資源の消費量]

アメリカの鉄鉱石は今後250年間分の埋蔵量があり、きわめて豊富な資源である。また鉄鉱石は燃えない、腐らないなどの点から、資源として安定している。さらに近年、鉄鋼生産における省資源化が進んでおり、省資源化率はすでに30%に達している。今後アメリカの住宅すべてに鋼材が使用された場合の鋼材使用量は年間7～8百万トンであり、粗鋼生産量が8千8百万トンであることを考慮すれば十分供給可能である。一方木材は、山火事による供給量の減少、小径木材の増加による品質の低下、など、供給が不安定となる要素が多い。

[生態系の破壊]

鉄鉱石の90%以上がミネソタ州で採掘されているが、

採掘にあたっては生態系の保護に十分配慮がなされている。木材は、すでにカナダ、南アメリカ、東南アジア、ニュージーランドなどから輸入している。その量は年々増加しているが、これらの国の環境破壊につながる恐れがある。

[製造上のエネルギー消費]

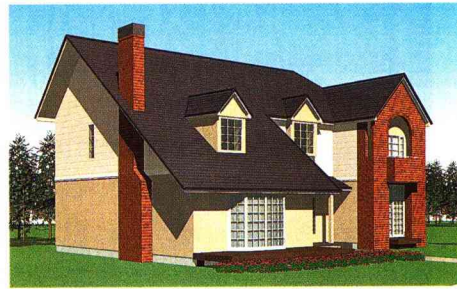
スチールハウス、木造住宅ともほとんど差がない。

このようにスチールハウスはアメリカを中心に高い評価を得ているが、日本国内のマーケットではどのような優位性があるのだろうか。

日本の住宅建築でいま最も関心の高いテーマは、耐震性である。世界有数の地震国である日本では、以前から地震に強い住宅への要請が強かったが、阪神・淡路大震災以後、改めて耐震性能へのニーズが高まっているのはいうまでもない。

スチールハウスは軽量であり、また構造的に地震などに強いという特長を持っている。また部材同士を強固に接合でき、風などによって吹き飛ばされたり、倒壊したりする恐れが少ない。アメリカでは、阪神・淡路大震災より激しい1,800ガル以上の震度だったノースリッジ地震や、伊勢湾台風以上といわれたハリケーン・アンドリュウの時でも無事だったことから、「災害に強いスチールハウス」の認識が高まったといわれる。

また、居住性は消費者にとって大いに気になる点だが、断熱性、遮音性は木造とほぼ同程度であり、むしろ木造の経年変化によるゆがみやきしみが少ない分、快適であるといわれている。しかも鋼材は構造部分に使用され、内装は従来の材料を使えるため、とくに違和感を生ずるといった心配はない。



各社のモデルハウスの例

着実に進む国内普及のシナリオ

じつは日本では、鋼材を住宅に使用するという試みは今に始まったことではない。昭和30年代に登場した、いわゆる軽量鉄骨住宅は、鋼材の新たな需要分野として当時注目を集めた。しかし、ローコストの公営住宅に採用されたことなどから簡易住宅のイメージが強く、結果的に大きな需要には結び付かなかった。

その後、昭和50年代から60年代にかけて鉄骨造、鉄骨系プレハブの住宅の着工戸数が徐々に伸びた。たとえば鉄骨系プレハブ住宅は1993年には約19万戸建設され、総面積は約1,600万㎡、主要構造部では約55万トンの鋼材が使用されていることになる。

しかしこれらの鋼材と使用する基準として、従来は構造材が2.3mm以上、二次部材が1.6mm以上という板厚規制が設けられていた。しかしスチールハウスに使用する鋼材は、もともと海外の基準によるものであり、その工法は、建築基準法第38条の規定による「認定が必要な工法」であるため、建築認定を受けるためには新たな評定基準が必要となる。

そこで、95年春から建設省を中心とするワーキンググループによって、日本におけるスチールハウスの評定基準の検討が始められた。この作業の結果、7月には、厚さ0.8mm以上の防食処理された冷延鋼板をタッピンねじなどで接合する工法が認められることになり、いよいよスチールハウスは個別認定によって建設が可能な段階へと進んだのである。

現在、鉄鋼メーカーや住宅メーカーにより、いくつかのモデルハウスが建設されている。これらの多くは、アメリカやオーストラリアの鋼材を仕入れて建設し、実際にその性能を確認している段階である。

またこのような個別のアプローチの一方で、鉄鋼業界をあげての取り組みを進めているのが鋼材倶楽部であり、すでに面材構造試験、接合部試験、耐久性試験などを実施している。さらに96年からスチールハウス促進期と位置付け、国産形鋼規格や設計基準の作成を進め、建築一般認定取得を目指した活動が本格化している。

今後、日本でのスチールハウスの普及を進めるうえでの問題として指摘されているのが、従来からの住宅業界との関係だ。アメリカでは、工務店へのPRが盛んに行われているが、スチール版2×4とはいっても、施工方法は自ずと違う。このような問題に対して鋼材倶楽部では高炉6社によるスチールハウス特別委員会を設置し、工務店の認定申請支援や、税制、公庫融資、保険などの制度整備、国産形鋼供給体制の整備、教育活動、広報活動などを進めていく考えだ。

96年3月には、IISIの第2回ワークショップが東京で開催され、国内での関心もいっそう高まっている。鉄鋼業界では鋼材倶楽部を母体としていずれ「スチールハウス協会（仮称）」を設立する予定で、スチールハウス普及の体制づくりは着々と進められているといえるだろう。

わが国は、超高層ビルなどで鉄骨建築が普及しており、いわば鉄骨造の先進国である。材料としての鋼材への信頼感が、多くの消費者にとって一生に一度の住宅建設という大事業にどのように結び付いていくのか。鋼材の一大マーケットとなる可能性が期待できるだけに、今後の動向から目が離せない。

取材協力・写真提供：（社）鋼材倶楽部、新日本製鐵（株）、NKK、住友金属工業（株）、川崎製鐵（株）

鉄の絶景

Steel Landscape.

京 都

静寂
の中
の鉄
ー京
都

茶どころ、宇治をひかえた京都。茶道成立の地であり、また、日本における茶の栽培においても発祥の地である。茶の湯に欠かせない道具、「茶の湯釜」の分野においても、京都は重要な役割を果たしてきた。



茶道を育んだ京都・宇治の自然



「茶室」と呼ばれはじめたのは江戸時代から、それ以前は「茶の湯座敷」「数寄屋」などの呼称であった



連綿と流れる茶の歴史。香りただよう宇治の街角

京都、利久の「侘茶」で統一された茶道

座禅と茶には深い関係があり、茶の誕生について次のような言い伝えがある。インドの達磨大師が座禅を組んでいたところ、つい眠りに落ちてしまった。悔やんだ大師は、二度とこの過ちを繰り返さないようにと、自らのまぶたを切り落とし捨ててしまう。そして、その捨てられたまぶたから芽が出て、茶の木が生えてきたのだという。

平安時代末期に大陸へわたった栄西は、その滞在中、当時の中国で盛んであった禅宗を学んだ。その修行の中心は座禅であり、そこに欠くことができないものがお茶であった。彼は禅を学ぶ中で、そこに必要不可欠な修行のひとつとしての「茶」を学んでいく。鎌倉幕府が成立する頃、栄西は帰国。幕府の後押しもあって、禅宗は全国へ広まり、それにともなって茶も普及していく。

先の達磨大師の言い伝えも、こうした禅と茶の深い関係から生まれてきたものだろう。

茶といえば宇治。宇治は日本茶を語るときに欠かせない名産地だが、栄西が大陸から持ち帰った茶の種子が最初に育成されたのが、この宇治の地であった。山を北に背負って南に向く傾斜地。水はけもよく、都の玄関口という交通の便のよさもあった。この宇治を抱く京都が、長い茶の歴史の中で大きな役割を果たしていくことになる。

今もお盛んな茶道は、桃山時代の京都で完成したとされ、千利久の手によるものである。豊臣秀吉が天下を統一したのに呼応して、その庇護下にあった利久が、それまでさまざまな技法が乱立していた茶の湯を統一していく。侘茶がその基調となった。空間の縮小化により、茶室は、その居る人の身分の平等を、究極的に求めるものとなる。四畳半もあれば身分的な序列をつくることができるが、二〜三畳の空間では、その余裕はない。それは、茶の湯は裕福な者のためだけにあるのではないという利久の思想の現れでもある。



茶道具を扱う古美術店の風景

心の安らぎをもたらす茶の湯

さて、茶の湯には道具が必要だ。当時の茶人の増大とともに、国内産の廉価な道具が必要になってきた。それまで絶対的な人気を集めていた唐物（中国製のもの）は、もはや手の届かない高嶺の花であった。唐物のコピーではない、国内産のオリジナルで優秀な茶道具……。こうして、桃山の美術品が数多く生まれる。

桃山で新しく開いた茶道具文化のひとつに、茶の湯釜がある。

桃山以前に釜の製作地として名高かったのは、筑前国の「芦屋」（福岡県遠賀郡）、そして下野国の「天命」（栃木県佐野市）であったが、桃山に入ってから地利を生かした京都、三条釜座で鑄造される「京釜」の勢力に押されて衰退していった。秀吉や利久の庇護を求めて、釜師たちも都に集まる。釜師と茶

人との結びつきは強く、西村道仁と織田信長、辻与次郎と千利久などがよく知られている。とくに、利久の発想で辻与次郎が作成した釜は「利久好み」といわれ、阿弥陀堂釜、雲龍釜などが著名だ。彼によって京釜が完成したとされる。

以来、茶道の歴史とともに釜づくりも脈々と受け継がれてきた。かつては、「たたら製鉄」による和鉄が主に使用されてきたが、現在では洋鉄の使用が多いという。

和鉄は硬いため釜や鍋に向いており、しかも錆びにくいとされる。つまり長持ちするということだ。しかし鑄造する場合、和鉄だけで湯回りが悪く、薄い釜をつくるのは困難だという。最低限の洋鉄などを加えていく、といった目分量の作業が求められ、経験の深さと技術的な水準の高さが問われる。しかし、伝統保持の技術者の高齢化、後継者不足については、この分野でも同様だ。

深い緑に囲まれた茶室の静寂の中で、小さく聞こえる釜鳴りの音。そして、釜表面に施された模様などの意匠の工夫も目に心地よい。釜師たちの創作が私たちに与えてくれるのは、こころの安らぎに他ならない。時を隔てた今もなお、茶道と、それを取り巻く道具の数々は人を魅了する。現実社会の喧騒から離れた静かな空間は、ゆたかさを求める現代において、ますます愛されている。



茶の湯釜は、世界に類を見ない鑄鉄製品の技術の精華であるといわれる

〔撮影：岡島善文〕

展望

21世紀に向けて、電気事業の未来技術 —トリレンマ解決への挑戦—

井上正明 (財)電力中央研究所 人事部 能力開発担当
Masaaki Inoue

Future Technology of Electric Utility in 21C. -Challenge The Trilemma Problem-

1 まえがき

人類が地球上にその第1歩を踏み出して以来、着実に輝かしい発展をとげてきた。

しかし、人類の歴史を見るといつの時代にもこの発展を妨げる壁があったが、人類はこれに英知を結集して、これを乗り越えてきたことが分る。

図1に示すように人類は、火を発見し、家畜のエネルギーを使い、薪や風力・水車を活用しやがて石炭・石油を使う現代へとつなげてきた。この流れこそが人類発展の鍵であったし、その時々これらを使いこなす技術を生み出して来たのである。

その歴史の延長上にある今、我々の前にどんな壁が現れてきているのだろうか。その壁を乗り越えないとどうなってしまうのだろうか。また、これを乗り越えるため、今、我々は何をなさねばならぬのか。そのようなことをここで考えてみることにしたい。

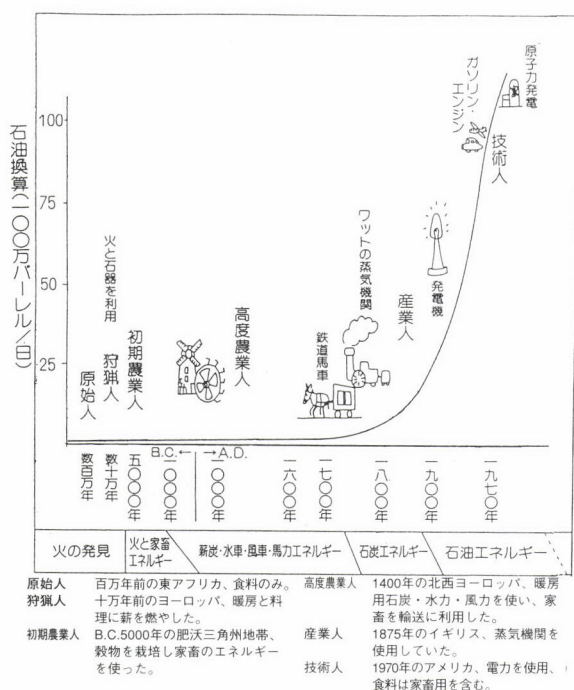


図1 人類のエネルギー消費 (資料: 電事連「94年版原子力図面集」)

2 化石燃料文明のもたらしたもの 「トリレンマ」とは何か。 ^{1)~4)}

人類の大きな飛躍をもたらしたものの一つに、化石燃料の入手・利用が挙げられることは言うまでもない。この過程では誰もが、「石炭や石油は掘れば出てくる」、「山や森には薪が取れる」、「煙突の煙は大気がとり込み、大海は汚水を浄化してくれる」……と言った無限性を地球に期待していたに違いない。その結果、数千万年・数億年かけて蓄積された貴重な化石資源は2~300年の間に使われてしまい、そのうえ地球環境に赤信号を燈すところまで来てしまった。

地球人口の1/4以下で構成される工業先進国が、これまで地球のエネルギー資源の3/4を消費してきたことを考えれば、人口の3/4以上で構成される発展途上国の工業化傾向が今までの方法で進んだ時には計り知れぬ影響があることは誰もが想像できることであろう。だからと言って我々は発展途上国の人々の使うエネルギーに制約を加える権利はない。むしろ上手な手助けが重要なのである¹⁾。

「経済発展」、「発展のための資源・エネルギー・食糧消費」、消費がもたらす「環境悪化」、この結果は「迫りくる人類の危機」へとつながることは明白であろう。

これら三つの要因が相互に絡み合っている難問を図2に示す「トリレンマ」と称している。そして、人類の持続可能な発展を問う時、今までのやり方では地球上の人口が

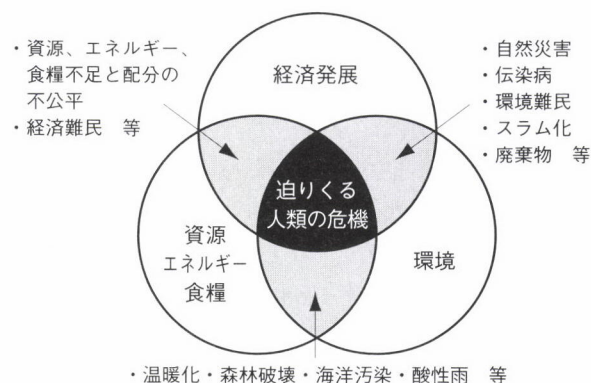


図2 トリレンマの構造²⁾

100億を越す21世紀中頃に具現してくる、避けては通れない難問である²⁾。

先述のように、かつての先人達が、それまでの古い考え方を転換し、全く新しい発想でルネッサンスや産業革命を成し遂げてきたように、我々も未来を見据えた新しい考え方（パラダイムと言う）と方法で解決し、地球と人類が共生・共栄する時代に相応しい社会のしくみやライフスタイルを創り出す必要がある。

図3に示すように我が国は、省エネによる経済成長を遂げてきた世界の優等生だ。だからこそ、これまで蓄積してきた知恵と技術を世界に向かって発信し、その原動力となる期待は実に大きいものがある。第16回世界エネルギー会議が95年10月、100余ヶ国、5000人以上を集めて我が国で開催されたこと、この課題に関し世界の相互理解の前進に寄与したことの両意義をもう一度考えて見るべき時である。

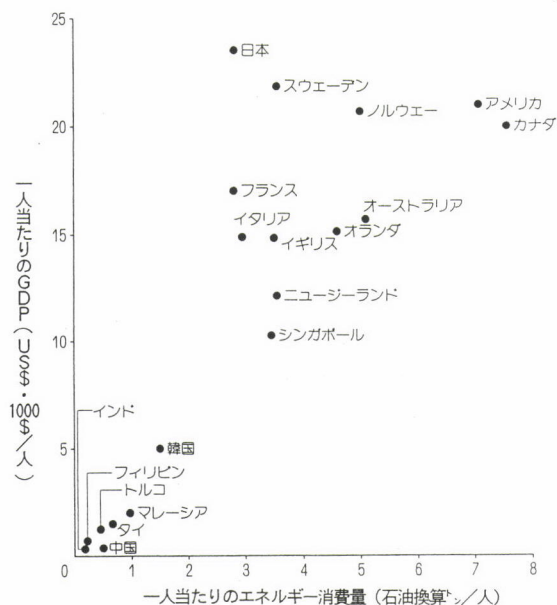


図3 経済成長とエネルギー (1989年) (資料：電事連「94年版原子力図面集」)

3 脱化石エネルギーに向けて

3.1 資源のない国—日本の将来エネルギー・資源—

1979年、IEA（国際エネルギー機関）理事会は「石油火力新設禁止勧告」を決議し、OECD（経済開発協力機構）加盟国に通知した。日本は、石油、石炭、天然ガスとしてエネルギー消費の不足分84%を海外に頼っているが、今までのやり方でゆけば21世紀中葉のエネルギー消費量は現在の約1.8倍、石油換算で年間7億トンと想定されている。¹⁾しかし、現状を見てもこれに見合う石油消費など国際的にも許されぬ方向にあり、その代替エネルギーを用意せねばならない。

ここで、我が国の将来エネルギー確保の点から重要なのは、「原子力基本法」。

その第1条では、「……原子力の研究・開発および利用を推進することによって、将来におけるエネルギー資源を確保し……」と、エネルギー対策の基本的な考え方が示されている。しかも、昭和30年の同法施行以来、この考え方に変更はない。

また、同法第2条では、「原子力の研究、開発及び利用は、平和目的に限り、安全の確保を旨として、……その成果を公開し、進んで国際協力に資する……」と、平和利用と安全確保が大前提であることが示されている。

さらに同法第4条では、原子力委員会、原子力安全委員会がその具体化のための企画審議・決定することとしている。そして、この条項により原子力委員会はほぼ5年毎に、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」を作成しており、最近では平成6年6月に公表された⁵⁾。この中でエネルギー確保、原子力開発利用を具体的に進める方法として、数値を挙げた目標として次の主旨を提言している。

- ①原子燃料サイクルを含む発電体系全体の安全性、信頼性、経済性が重点である。
- ②使用済み核燃料（使用済燃料と言う）は再処理し、プルトニウム（Pu）や未利用ウラン（ U^{238} や U^{235} ）などを回収し、再利用する。
- ③このため、軽水炉から将来は高速増殖炉（Fast Breeder Reactor ;FBRと略す）を発電の本命炉とし、Pu利用を実用化することで、ウラン資源を軽水炉より約100倍⁶⁾も有効利用する。

ここで重要なことは、同法によって我が国の基本的考えは脱化石エネルギーを原子力利用で実現することを明示し、さらに将来の本命がPu利用であると方向づけていることだ。

この問題に関して電気事業は、「必ずしも化石燃料にのみ依存しなくてもよいエネルギー産業」、という特徴を生かすことができる。電気事業は火力発電など環境技術やエネルギー利用効率の改善、省エネ型都市・住宅の開発・支援といった研究開発はもとより、太陽光や地球深部の高温岩体など自然エネルギーの開発、原子力の定着化、さらに次世代エネルギー資源の確立など自らの役割と責任を果たすべく、研究開発に取り組んでいる。

3.2 先ずは、アジアのリード役に

図4は各国の電力消費量が工業化・生活向上や教育・医療の高度化をもたらし、最終的には人口増加の低下をもたらす、といった電力利用と人口問題の間接的な関わりがある事を示しているように思われる。この大胆な仮定を信ずるなら発展途上国の電気文明化は、トリレンマ解決の一手段となろう。この電力供給に当たり化石燃料の使用が減少できれば、地球環境問題も前進するであろう。この意味で原子力平和利用の果たす役割は大きい。

平和利用は日本はもとより、国際的にも考え方を定着させることが大前提となるのだが、国内に資源がほとんどないにもかかわらず経済発展、エネルギー、環境問題の一応のバランスを達成しつつある我が国は、今後も原子力の電力利用分野で人類の発展のための牽引役の期待が大きくなる。

今、地球上すべてを対象とした対トリレンマ戦略作りなら、国際機関のIEAやIAEA（国際原子力機関）を活用し、我々はこれをバックアップするのがベストであろう。

もう一つは、東アジア、東南アジアなど緊急かつ重点的な個別地域を対象とするケースがある。現にアジアの国々は経済発展に向けエネルギー・環境問題に直面し、将来のエネルギー源として原子力発電を選択している。しかしその前提は、アジアの核不拡散問題と事故安全問題だ。この点、日本は技術的・経済的な面から十分な協力が出来る。即ち、我が国の原子力発電が小さなトラブルは経験しつつも安全裏に高稼働している事実と国際的な信頼のもとPuの安全な管理を続けていることから、この自信は出てくる。さらにこの自信を強固にするため、現在に増して技術・情報の透明性を確保する事が重要である。過去に関しアジアの国々は、我が国に色々な感情を持っている。戦後50年を過ぎ、改めてアジアの国々をエネルギー技術の面で支援できる時が来たのである。

一方、進行しつつあるアジア諸国の環境問題に対しても、我が国がこれまで環境保全に取り組み培ってきた技術的・人的資源で積極的に貢献できるし、これに係わる現地技術陣の育成へのニーズの高まりにも対応できるのである。

アジア地区のエネルギー問題は緊急かつ重大であるが、日本はこれに対するリーダーとしての役割が果たせる、と言えるし、ひいては地球のエネルギー・環境問題解決の一助となり、我々の子孫の将来にもプラスとなって返ってくるのである。

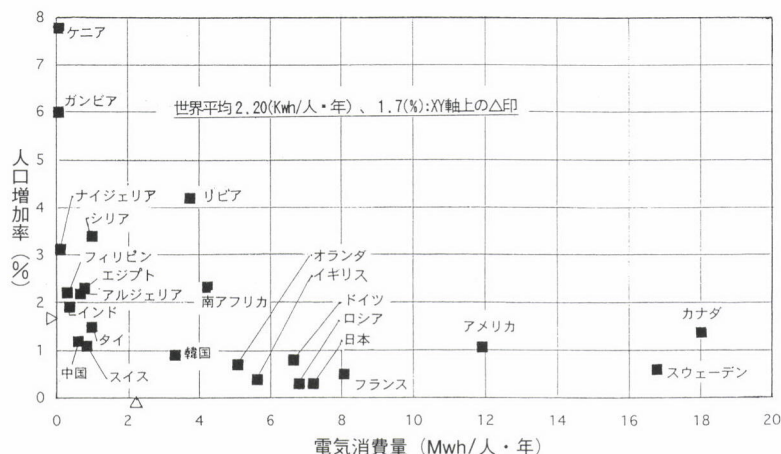


図4 人口増加と電力消費（資料：世界国勢図会・1995年より作図）

3.3 原子力発電にかける夢

さて、ここで問題となる、資源面、環境面から原子力の将来性を考えてみよう。化石燃料は良く「枯渇する」という言葉が行きかう。「枯渇」という言葉がない、とすれば、それは太陽、風、波、地熱……など自然エネルギーであろう。しかし、これらは現状では研究開発が進められているものの、信頼性や経済性などいろいろな課題が残っており、実用化にはまだまだ時間や費用が必要と思われる。

ところで、資源埋蔵量の推定がいろいろ発表されているが、一つの例を図5に示す。「95年世界エネルギー会議・資料」⁷⁾によれば、確認埋蔵量と現状のペースで採取した時の可採年数は、石炭1兆300億トン、230年、石油1兆300億バレル、45年、天然ガス141兆m³、56年である。ウラン（化学記号U、ウラン資源としては、U²³⁵とU²³⁸が対象となる）は、1kg当り130\$で採掘できる分として223万Uトン、68年だそうである。これだけ見る限り、原子燃料の先行きは、さほど明るくないようだが、後述のように現在発電に寄与していないU²³⁸をPuに変えFBRで発電に利用できる技術が定着すれば、ウラン資源を軽水炉より約100倍も有効利用でき⁶⁾、68年でなく6000年近くになってしまう。さらにUは海水中にも40億トンが存在する⁶⁾と言われており、このうちのごく一部でも回収し、利用できる日が来れば、資源的にはかなり夢のある話に見えてくる。現に、海水中からUを回収する技術は我が国で研究が続けられている。

一方、環境面を考えると、指摘されるのは主に事故時の放射性核種の放出と放射性廃棄物の処分に関するものであろう。このうち廃棄物は大きく2つに分類できる。

その一つは、発電所の運転中や定期点検時に出る手袋、靴下、ウエス、これらの洗濯排水など「低レベル廃棄物」と言われるもので、これらは焼却・乾燥させ、ドラム缶内にコンクリートで固め、厳重な検査のうえ青森県内に地中埋設処分され始めた。これらは比較的放射能が少ないうえ短期のうち

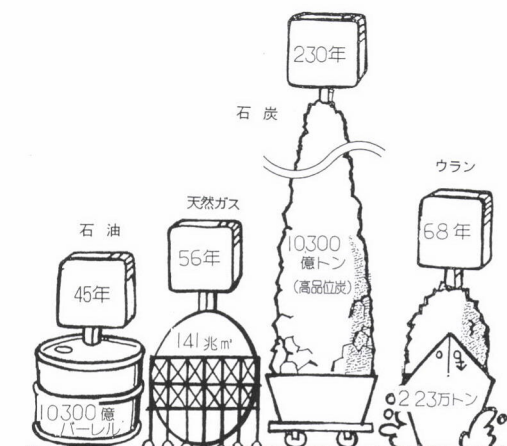


図5 世界のエネルギー資源（参考資料：7より作図）

にほとんど零近くまで減衰してしまうので、将来は、埋設地点であっても人間の住環境が確保できる予定である。

もう一つは、使用済燃料の再処理に伴って出る超ウラン元素 (Trans Uranium; TRUと言う) などを含む「高レベル廃棄物」 (High Level Waste ;HLWと略す) と言われるものである。最近フランスに再処理を委託したことに伴って発生したものがガラスに固化され、第1回分として28本 (約14トン) が94年10月に返還され、現在青森県内に保管されている。

これらは、放射能レベルが高いものや半減期が100万年以上に及ぶTRUも含まれているので、廃棄に関しては人類の生活圏内から隔離する事が考えられており、このための研究開発が、当電力中央研究所も参加する9ヶ国の国際共同研究として、スウェーデンで進められている。しかし、この様なTRUも取り出して燃料として用いることが出来れば、問題の本質的な解決に繋がる。

そこで、当電力中央研究所はこのHLWに含まれるTRUを独自の方法で分離し、燃料にしてしまう研究を行い、技術的な見通しを得ている。この部分は4.2で述べることにする。

4 安全性・信頼性 —金属燃料FBRの実現に向けて—

図6は、21世紀のエネルギーをまかなうため、現在の軽水炉燃料サイクルに新たにFBR燃料サイクルを加えた最終形態のサイクルで、電力中央研究所の研究対象である。

後者のサイクルの組み合わせで始めて燃料の有効活用とTRUの消滅が実現する。ここでは、Pu利用新技術としてのFBRの新しい研究の中から代表例を紹介したい⁴⁾。

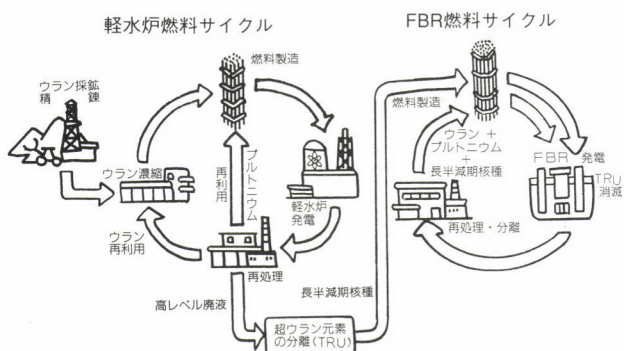


図6 21世紀を目指す燃料サイクル⁴⁾

4.1 将来のプルトニウム利用時代に向けた研究開発 —金属燃料FBRと乾式再処理—

FBRは、天然ウランの99.3%を占める核分裂をしない U^{238} とPuをほぼ8:2で混ぜた燃料を用い、発電しながら U^{238} をPuに変えてゆく、即ち使ったPu以上のPuを生産しつつ発電ができることから「増殖炉」という言葉が使われてい

る。「高速」とは、Puの核分裂にエネルギーの高い「高速中性子」を用いることから使われる言葉である。また、Puの核分裂熱を取り出すために水ではなくナトリウムを用いるのも特徴である。従って、FBRの重要な技術はPu管理とナトリウムの取扱い上の安全問題である。特に後者は水や空気中の酸素・水蒸気などはげしく化学反応し、爆発や火災を発生させる危険がある。1995年12月8日の「もんじゅ」のトラブルは、放射能の含まれていない2次系ナトリウムによる一例である。

このFBRの未来技術の一環で当所が重点的に研究しているのが「金属燃料FBR」と金属燃料の「再処理」である。金属燃料はUとPuなどの合金である。このため、現在のセラミック系の「酸化物燃料」に比べ熱伝導が良いため燃料の中心温度はかなり低く、高い燃料加工精度も要求されない。さらに金属燃料を用いる事によって、極限を仮想した最悪事故時にも炉が暴走しないとの実験と理論を基にした研究成果も米国で発表されており、「金属燃料FBR」が原子炉として究極の安全性を持っている事が、最近分かってきた。この研究については機会があれば別に紹介したい。

もう一つは、金属燃料を図7に示す「乾式法」という方法で再処理する技術。実はこの技術、1944年、原爆開発研究 (マンハッタン計画) の失敗例からのヒントでできた技術だ。もともと、燃料の再処理技術は、原爆用Puの製造が目的で開発されたものだ。しかし、1945年7月1日アラモゴルドの砂漠での核爆発実験成功以前、多数の不発爆弾が作成されていた。即ち核爆発を起こさないPuを再処理工程で作ってしまったのである。

その後再処理技術「湿式法 (ピューレックス法)」の発明によって軍事用Puの生産に成功した。さきの失敗の原因は、PuとTRU (この場合キュリウムという元素: 化学記号 Cm) が混合して回収されたためであることが分かった。戦後数十年間、日の目を見ることのなかったこの再処理法が、平和利用、即ち爆弾にならない発電用Pu生産用として見直され、改良が加えられて出来たのが「乾式再処理法」である。

従って「乾式法」には人類にとって素晴らしい2大長所が入っているのである。その1つは、この方法で回収されたPuは、爆弾とすることが不可能であること。もう1つは、現在廃棄物と考えられているTRUもPuと混合された形で回収され燃料として閉じ込められてしまうこと、である。

このように、乾式法は、TRUが出ないため廃棄物取扱い施設が簡易なこと、金属燃料は酸化物燃料に比べ成形加工工程が簡素化できることなどから再処理施設全体が現在の湿式法に比べかなりコンパクトになり、燃料サイクル施設の建設・運転費も軽減され、さらには発電所構内に再処理施設が並設 (IFR計画) されれば、使用済燃料の公道輸送

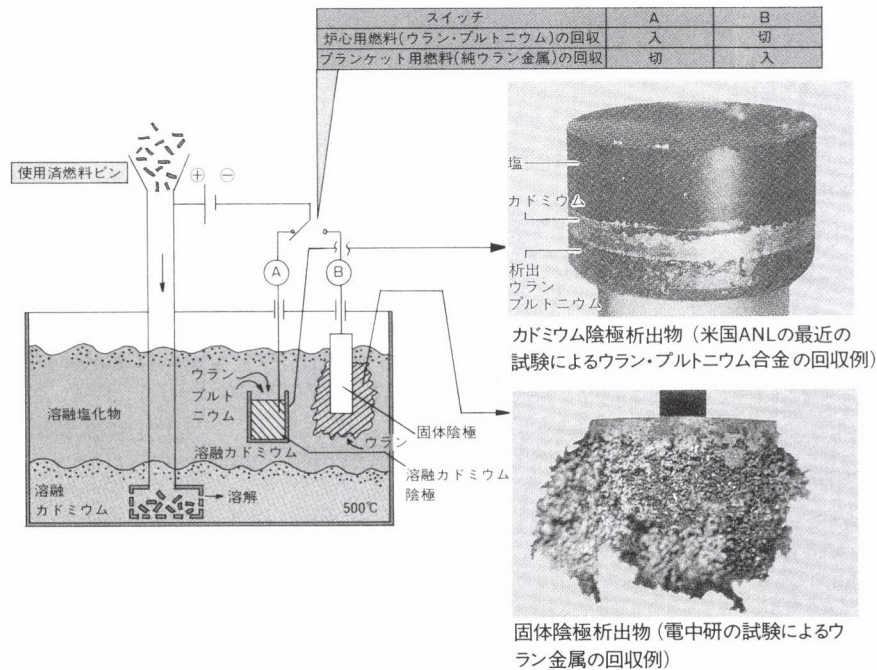


図7 電解精錬法による乾式再処理法（資料：電中研「電中研ニュース」No.165）

もなくなるなど、安全性・経済性も加わった究極の姿が期待できることだ。

核不拡散性と対環境性。安全性と経済性。まさに神が人類のために与えた技術と言えるのではなかろうか。

この研究を総合的に検証するため、当研究所は我が国の電気事業を代表して米国のアルゴンヌ国立研究所において日米共同研究を実施してきた。しかし近年、米国での原子力予算の関わりもあり、この共同研究は終了するが、得られた成果をベースとして電力中央研究所が独自の研究計画へと引き継ぐ予定である。

4.2 高レベルの放射性廃棄物がなくなる日

ー放射能の消滅処理

現在青森県で建設中の再処理工場では、軽水炉の使用済燃料からPuなど有益な資源を抽出した後は、TRUなどを含むHLWが発生する。

もし「TRUを廃棄物から分離し、別の核種に変えられれば」という研究者の一つの夢が完成されようとしている。「群分離・消滅処理技術」と呼ばれ、我が国では1988年10月、原子力委員会がこの研究開発長期計画（オメガ計画と言う）をまとめた。

電力中央研究所で行っているこの研究の特徴は、高レベル廃液のTRUを乾式再処理法で回収し（群分離）、FBRで発電しながら消滅させる（消滅）方法で、次の通りである。

- ①高レベル廃棄物（主にTRU）は再処理工程でPuと同時に分離され再び燃料内に閉じ込められ、外部に出されない。（当所と米国・アルゴンヌ国立研究所と共同研究）
- ②TRUはFBRの発電に伴い、別の核種に変えられてゆく。

③FBRの使用済燃料は、再処理によりTRUを含まない廃棄物や貴金属が回収され、TRUやPu、未燃のUは再び金属燃料サイクル内に閉じ込められる。

電力中央研究所と、EU（ヨーロッパ連合）の「超ウラン元素研究所」との「消滅」に関する共同研究によれば、金属燃料中に5%程度までのTRUを混合しても燃料性能が変わらないことも明らかにしている。

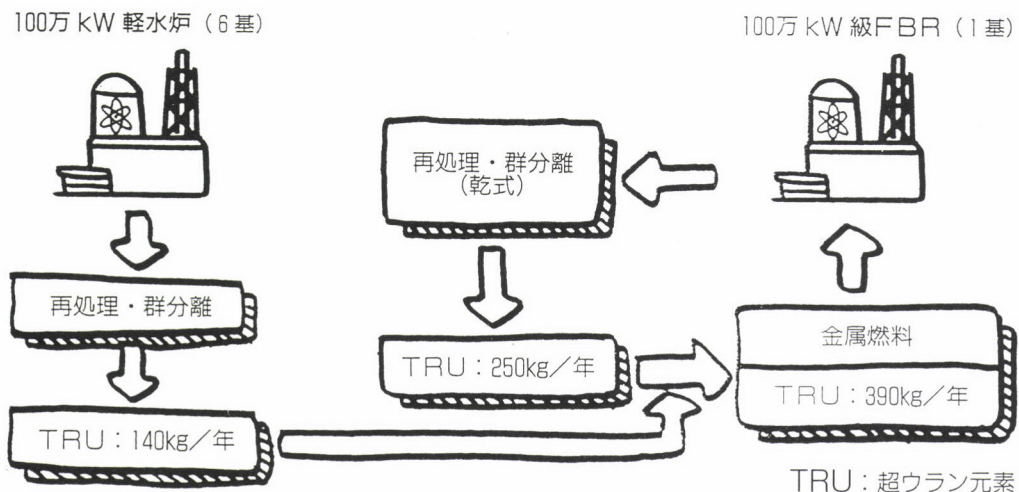
図8に示すように、当研究所の試算によれば、100万kWのFBR用金属燃料にTRU5%を混合するケースでは、FBR自体から出るTRUの他、100万kWの軽水炉5～6基から生じるTRUの処理が期待できるのである。

4.3 宅配用原子炉の時代 ー超小型FBRの構想―^{8)・9)}

さて、ここで少し夢のある話に移りたい。夢といっても現実にIAEAは発展途上国支援を目的としてこの研究開発に賛同しており、国際会議でも大きな話題となっている一それが、当電力中央研究所が提案した超小型FBR構想である。

発展途上国のトリレンマ解決のため、原子力の貢献を考えると、対象地域が広くかつ人口が点在し、地域紛争も考えられるため、大型炉・長距離送変電・施設というのは、経済性や安全性・信頼性（送電ルート）の面から適切とは言えない。即ち、相当な数の地域分散型となる。また、IAEAは発展途上国用の原子力として「核不拡散に対する安全」と「事故時への安全」ならびに「建設・運転コスト」を必要要件としてあげている。

一方、当研究所が原子力の究極の姿を追い求めた結果として独自に提案した超小型FBR（4Sと言う。Super-Safe, Small and Simple）の構想は上の要件と一致することが分



現在の発電に使用されている100万kWクラスの軽水炉6基分からTRUが年に140kg出る。一方、今後実用化が期待される100万kWクラスの金属燃料を使用したFBR炉ではTRUが年に250kg出る。これを軽水炉から出たTRUと一緒に混ぜて金属燃料として作り、これをFBRで燃やしてやることにより、TRUを消滅させるというもの

図8 金属燃料FBRによるTRUの消滅 (TRUを5%含む場合)⁴⁾

かったのである。4Sの構想を図9に示す。4Sの概要と、主な特長は次の通りである。

原子炉ユニットとして、炉心、中間熱交換器、崩壊熱除去コイルなどが一体で、出力5万kW。直径1cm、長さ6mの燃料棒が約4000本、プルトニウム量で1.3tonの燃料集合体を燃料とし、10年間燃料交換なし。容器は直径2.5m、長さ23mの円筒形で半地下設置のため地震に強く、蒸気発生器や発電機を合せても小学校の体育館程の大きさである。

炉心の長さ6mの燃料集合体の周囲に長さ2mの環状反射体という燃料から出る中性子を内部に反射させる筒がある。その内部だけで核分裂が盛んに生じ、環状反射体以外のところでは中性子は外部に拡散され核分裂が少ない。環状反射体は1日1mmの速度で移動し、10年間で炉心全体を移動し、発電を終了する。

この原子炉の特長は、現地での燃料交換なし、運転操作不要、機械的に動く部分が極度に少ない、点である。従来原発のトラブルは運転時や燃料交換時の誤操作や機械部分が主であったので、この原子炉は、保守・点検も不要である。

さらに、小型かつ大量生産のため工場での標準化設計・一体化生産ができ、高品質・低コストが確保できる。また、地球上に数千、数万機が分散してもこれらの核管理は一括してIAEAで衛星を用いて行われ、また燃料交換・乾式再処理も特定工場以外不可能なので核不拡散性は確保される。現在はさらに小型の炉へのニーズも高まり、全長6メートル余りの1万kW級の原子炉の概念設計も進められている。対象は数千～1万人程度の村落での海水淡水化を兼ねた分散型電源である。

もちろん、途発展上国以外でも十分活用でき、離島や僻地の電源、大型民間施設のコジェネシステムとしても、送電線が不要でかつ10年間に一度の原子炉の交換、すなわち、現在の家庭用のプロパンボンベのようにどこにでも配達できるのである。

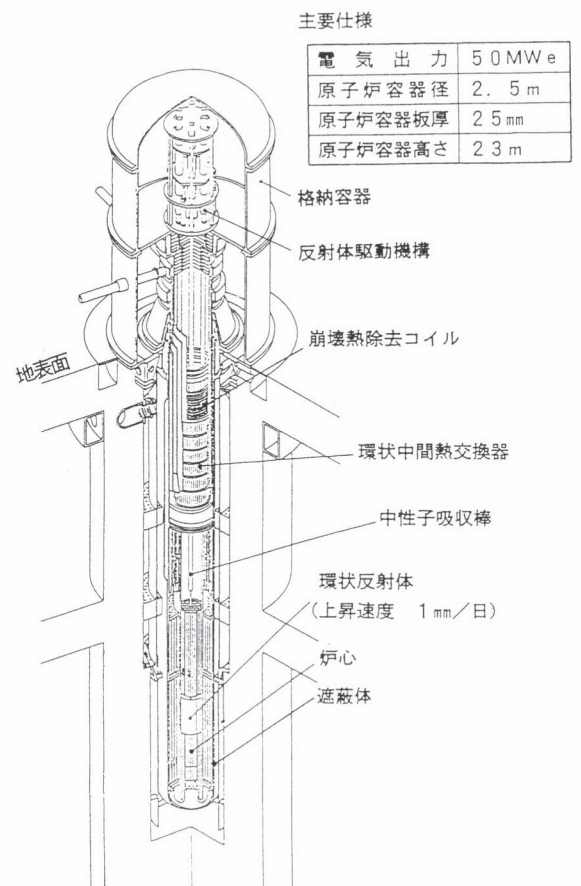


図9 超小型FBR (4S) の構想⁴⁾

5 むすびに代えて

人類の発展の前に大きく立ち塞がる壁、トリレンマ問題の解決には大変な困難がつきまとう。その第1は、発展途上国における人口増、エネルギー消費増であり、第2は先進諸国の省エネ・省資源である。しかし、この壁が人類の危機をもたらすとすれば、これを技術によって突破するしか道はない。こと原子力問題に関しては、とかく核兵器と事故時を思いうかべての「原発反対論」があり、また世界的な原子力政策の見直しの中でなぜ、日本、仏などが原子力発電推進をかかげているのか、といった疑問が専門家を含め意見が多くあるのを筆者は理解している。これらの国々が再び化石燃料にUターンした時、将来の地球環境はどうなるのか。このツケが回されるのは我々の子孫である。原子力に反対なら当然これに代わる提案を伴わねば大人の意見として扱うことができない。冷静な目を養い、子孫の将来のために評価・選択するのは今である。筆者は研究所で「電気事業における原子力分野の研究が必ず人類の幸に結びつく」との信念を持ってこの分野の研究に携わってきたが、原子力の平和利用のみですべて解決できるものではないことも理解している。ポイントとなるのは、一人ひとりが自分のできる範囲でトリレンマに向かって何をなすか、ということである。「がまん」ではなく、社会システムやライフスタイルを楽しみながら変えてゆける、発想の転換が鍵を握るであろう。

電力中央研究所は1951年11月、電力再編成に合せて出来た非営利目的の学問中心の研究機関であり、すべての運営のための資金は、国民の支払う電気料金の0.2%で賄われ

ている。工学・理学・農学・経済学・法学など多分野の700名の一流研究者がトリレンマ解決など社会をバックアップする研究開発を重点的に進め、電気事業の課題解決を通して社会に奉仕することを業務の基本としている。今後とも独創性溢れる先端技術の開発を目指して邁進する研究所でありたいと願って皆が一丸となって努力していることを記して、むすびとしたい。

参考資料

- 1) 井上正明, 他: 創立40周年記念論文集, (財) 電力中央研究所
- 2) 依田直: トリレンマへの挑戦, 毎日新聞社
- 3) 新田義孝, 他: 破局からの脱出—エネルギーからトリレンマに挑戦する—, 電力新報社
- 4) 「二匹目の電気うなぎ」, 日本工業新聞社
- 5) 「原子力の研究, 開発及び利用に関する長期計画」, 原子力委員会 (H6.6)
- 6) 服部禎男: プルトニウム問題について, PETOROTECH, (石油学会) 93.16-4
- 7) “Survey of Energy Resources 1995” World Energy Council.
- 8) 服部禎男, 湊章男: 超小型高速炉 (4S-50MWe) の設計思想, 日本原子力学会誌 36-10
- 9) N.Ueda, others: “Super-Safe, Small and Simple reactor for the global energy demand,” Proc. of Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, 1991

(1996年1月18日受付)



入門講座

鉄鋼材料編-4

鉄はなぜさびるのか —鉄の腐食化学入門—

松島 巖

NKK総合材料技術研究所 主席

Iwao Matsushima

Corrosion Characteristics

1 腐食とは何か

金属がそれを取り囲む環境と化学的に反応して失われる現象が腐食である。化学反応は高温で生じやすいことは周知の通りである。鋼を空气中で数100℃以上に加熱すると、鋼の表面が空气中的酸素と反応（腐食）して酸化鉄になり、その分だけ鋼が失われる。コークス（炭素）を空气中で燃やすと、炭酸ガスや一酸化炭素になるのと同じである。

我々の身の廻りでは、常温かそれより少し高い温度でも腐食が起こっている。温度が高くないのに腐食という反応が十分進行するのは、電気化学反応と呼ばれる化学反応が起こるからである。その状況は、乾電池に生じる反応がよいモデルである。

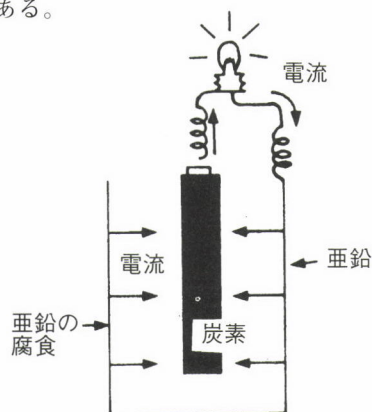


図1 乾電池（電気化学的腐食のモデル）

図1に示した乾電池には中央に炭素棒があり外側に亜鉛のケースがあって、その間に黒色の化学物質が詰まっている。電池に豆電球をつなぐと、直流の電流が⊕極である炭素棒から導線と豆電球を経て⊖極である亜鉛ケースに達し、さらに黒色物質を通して炭素棒に戻る。

こうして豆電球は点燈するが、同時に、流れた電流量に比例して亜鉛が溶ける。これは腐食である。黒色物質を腐食環境に見立てると、直流が金属から環境へと流出するのに伴って腐食が生じていることが分かる。これが電気化学反応による腐食であって、常温でも十分進行する。

*1：淡水や土壌でも基本的には同じである。

2 炭素鋼の腐食

2.1 ひとつのモデルケース

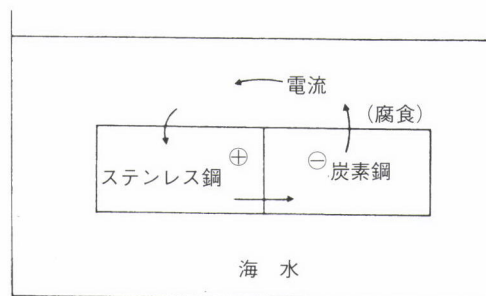


図2 (a) 炭素鋼にステンレス鋼を溶接したことによって生じる炭素鋼の腐食の原理図。矢印は電流の流れの方向を示す。電流は炭素鋼の全表面から海水中に流出する。

乾電池から現実的な腐食へと話を移すために、図2 (a) のようにステンレス鋼と炭素鋼を溶接して、海水中に浸した場合^{*1}を考える。ステンレス鋼が⊕極、炭素鋼が⊖極になって、直流の電流が、ステンレス鋼→炭素鋼→海水→ステンレス鋼というように流れる。乾電池とちがって導線や豆電球はないが、両金属は溶接でつながっているのだから必要ない。黒色物質のかわりが海水である。直流は炭素鋼から環境へ流出しており、炭素鋼が腐食する。

ところで、⊕極と⊖極があるだけでは電流は流れない。電流が流れるようすをもう少し詳しく考えるために、図2 (b) を示した。ステンレス鋼と炭素鋼を溶接するかわりに導線でつないであるが、腐食を考えるうえでは、図2 (b) は図2 (a) とまったく同じである。⊕極（ステンレス鋼）から⊖極（炭素鋼）へと金属内を直流が流れているということは、その反対の方向へ電子 e^- が流れているということである。電子は金属ではない海水中を、そのままの形では流れることはできない。海水中ではイオンが動くことによって電流が流れる。したがって電流が流れるには、ステン

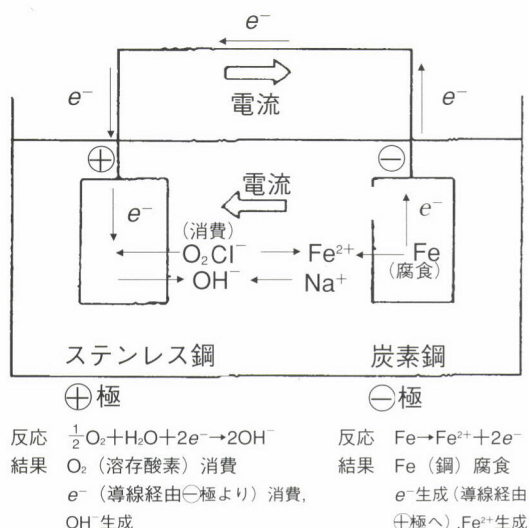


図2 (b) 図2 (a) における反応の詳細

レス鋼上では電子が消費されて $\ominus$ イオンができ、炭素鋼上では電子と $\oplus$ イオンが生成することが必要である。

まず、 $\oplus$ 極での反応を考えよう。ここで電子を消費するのは海水に溶けている酸素（溶存酸素。ふつう、空気から供給される。魚がエラで呼吸しているのは溶存酸素である）である。溶存酸素と電子が反応して OH^- イオンを作る^{*2} [$\frac{1}{2} \text{O}_2$ (溶存酸素) + H_2O (水) + 2e^- (電子) $\rightarrow 2\text{OH}^-$ (水酸化イオン)]。

一方、 $\ominus$ 極では銅が溶けて鉄イオンとなり、あとに電子が残ればよい^{*3} [Fe (鉄) $\rightarrow 2\text{Fe}^{2+}$ (鉄イオン) + 2e^- (電子)]。

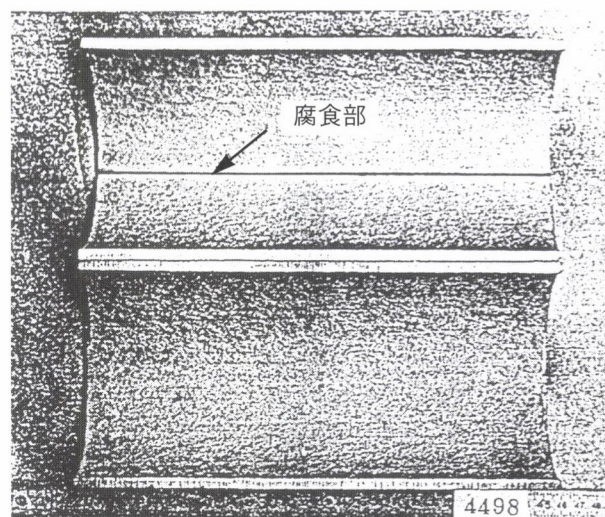
こうして $\oplus$ 極付近では 2OH^- が、 $\ominus$ 極付近では Fe^{2+} ができるが、溶液中ではあらゆる場所でイオンの $\oplus$ 電荷と $\ominus$ 電荷の合計が同一でなければならない。このため、 OH^- が生成するごとに何らかの $\oplus$ イオン [海水中では主にナトリウムイオン (Na^+)] が $\oplus$ 極へ動き、 Fe^{2+} が生成するごとに何らかの $\ominus$ イオン [海水中では主に塩化物イオン (Cl^-)] が $\ominus$ 極へ動く。これは海水中を $\ominus$ 極から $\oplus$ 極に向かって直流が流れたことを意味する^{*4}。

以上の結果直流は流れ続け、溶存酸素の消費と銅の腐食

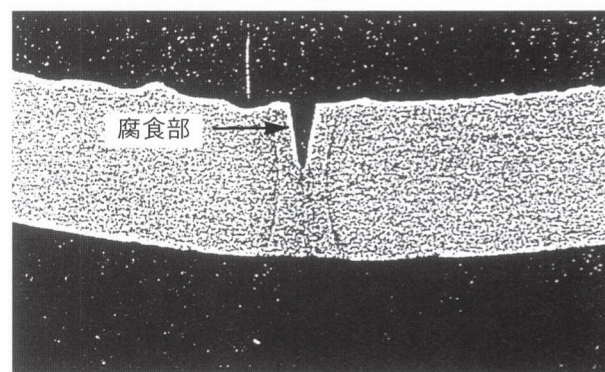
が生じる。すなわち、海水中で溶存酸素の作用によって銅が腐食したのである。溶存酸素は中性環境（銅の場合ほぼ pH5~9）で生じる腐食のほとんどに必要なである。海水から溶存酸素を除去すれば、銅の腐食は起こらない。pH<4といった酸性環境での電子の消費については、2.5節で述べる。

2.2 いろいろな腐食電池

2.2.1 異種金属の接触による電池



(a) 管内面



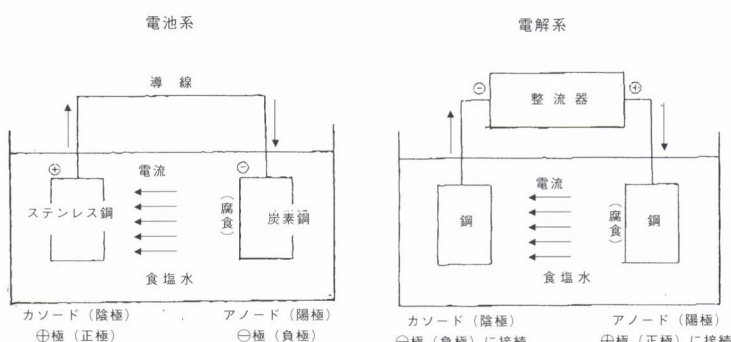
(b) 電縫部を含む断面

図3 電縫鋼管の電縫部に選択的に生じた腐食 (100A) (外径114.3mmの鋼管)

^{*2}: このように電子を消費する反応をカソード反応または陰極反応（還元反応である）と呼び、カソード反応を生じる電極をカソードまたは陰極と呼ぶ。

^{*3}: このように電子を放出する反応をアノード反応または陽極反応（酸化反応である）と呼び、アノード反応を生じる電極をアノードまたは陽極と呼ぶ。

^{*4}: 電気化学反応を生じる系には、電池系と電解系とがある。前者では自然に起電力が生じて直流の電流が流れるのに対し、後者では回路に直流電源を挿入することによって電流を流す（付図参照）。どちらの場合も、電流が電極から電解質へ流出する側の電極をアノード（陽極）、電流が電解質から電極へ流出する側の電極をカソード（陰極）という。金属が溶解（腐食）するのは電流が流出するアノードである。自然に生じる腐食は電池系であり（付図と図2 (b) を対比されたい）、電池系ではアノードは $\ominus$ 極すなわち負極である。本稿で扱う腐食はすべて電池系である。電解系でアノードとなるのは外部電源の $\oplus$ 極すなわち正極に接続された電極である（特殊な腐食に電解系のものもある）。電池系で陽極（アノード）が負極（ $\ominus$ 極）というのはおかしいように感じられるかもしれないが、「陽極」はアノード（酸化が生じる電極と定義）の訳語であって、正負の意味はない。電気化学の基礎のある読者、あるいは今後より専門的な文献に進まれる読者は、電極の正負よりも「電流流出＝アノード＝腐食」という考え方のほうが電池系、電解系を問わず適用でき統一できるのでお勧めしたい。



2.1節で述べた腐食電池は、この種の電池のひとつである。ステンレス鋼のかわりに、ニッケル、チタン、銅、すず、鉛あるいはそれらの合金が炭素鋼につながっていると、結果は基本的に同じである。このような腐食を異種金属接触腐食と呼ぶ。

2.2.2 鋼の不均一による電池

他の金属がつながっていなくても、炭素鋼自体が不均一であれば、部分によって⊕極と⊖極になる。

代表的には、溶接部が⊖極、母材部が⊕極となり、溶接部に腐食が集中する場合^{*5}があげられる。図3は、水配管に用いた電縫鋼管の電縫溶接部が選択的に腐食した例である。電縫鋼管は長い帯状の薄銅板を丸めて筒状にし、合せ目を電気抵抗溶接して作るが、普通の電縫鋼管では溶接部分は溶接時の加熱の影響を受けて母材とは異なった電気化学特性を持つようになり、水中などで母材に対し⊖極となって腐食する^{*6}。電流の流れるようすを図4に模式的に示した。

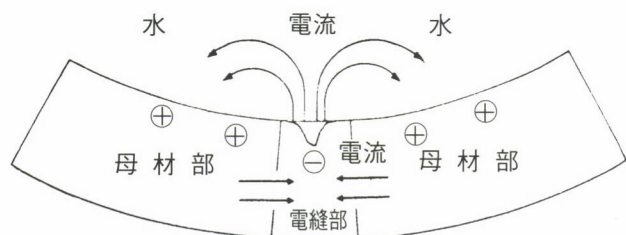


図4 電縫鋼管の電縫部に生じる選択的腐食の原理図

別のケースは、ミルスケールが全面に付着した炭素鋼板を、海水中などで用いるとき生じる部分的なえぐれである。ミルスケールは銅板を高温で圧延するとき、表面が空気中の酸素によって酸化されて生じた酸化鉄であるが、これには多数の割れ目などがあって、その部分では鋼の素地が露出している。海水中ではミルスケールが健全な部分が⊕極、素地が露出している部分が⊖極となり、⊖極部分から腐食電流が海水中へと流出して腐食を生じる。その状況を図5に示した。

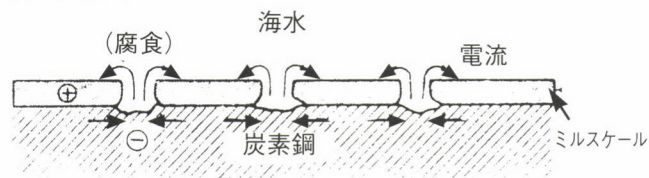


図5 ミルスケールが付着した炭素鋼の素地露出部における選択的腐食の原理図

2.2.3 通気差による電池

以上に述べた腐食電池では、すべて金属側に⊕極、⊖極ができる原因があった。しかし、実質的に均一な鋼表面でも、部分によってこれに接する環境にある種のちがいがあることが原因となって、⊕極と⊖極ができることがある。ある種のちがいは、ほとんどの場合、溶存酸素の濃度、ひいては供給速度のちがいである。

いま、ある線を境にして一方は湿った砂、他方は粘土でできている地面があったとする。それぞれの土の中に炭素鋼管を一本ずつ埋めると、砂は空気をよく通すためその中の鋼管は溶存酸素によって腐食するが、粘土はあまり空気を通さないで、その中の鋼管はほとんど腐食しない。

次にこれらの鋼管をつないで一本にしたとする（図6）。電気化学的な理由で、溶存酸素の多い砂の中の部分の鋼管が⊕極、溶存酸素の少ない粘土中の部分が⊖極となる^{*7}。このため、腐食がはげしいのは粘土中の部分となる。砂中の部分が溶存酸素を消費し、それに見合う鋼の溶解が粘土中の部分で生じるのである。

同じ原理による腐食は、水配管の内面にも生じる。水配管にはしばしば、「さびこぶ」と呼ばれるこぶ状のさびが多数生じる（図7（a））。管を開きさびこぶを除去すると、

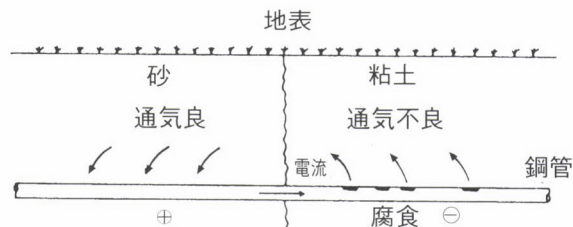


図6 土壌の通気性のちがいが原因となって生じる通気差電池と埋設鋼管の腐食（原理図）

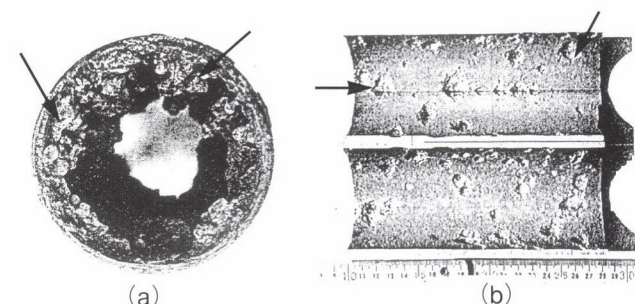


図7 炭素鋼水配管に生じたさびこぶ下の腐食（65A）
（外径76.3mmの鋼管）
（a）さびこぶ生成状況（矢印の部分ほか多数）
（b）さびこぶの下に生じた局部腐食（矢印の部分ほか多数）

^{*5}：溶接部が必ず⊖極となるわけではないが、そういう場合がよくある。

^{*6}：このことを「母材に対し、電位が卑になる」と表現する。すなわち、母材と溶接部を切り離したときのそれぞれの電位（開路電位）は、母材に対し溶接部のほうが低い（卑である）ということを意味する。母材と溶接部はつながっているため、腐食環境中でこれらの電位はほぼ同じとなる結果、卑な部分の電位が貴なほうに持ち上げられて腐食が激しくなる。

^{*7}：2個の鋼電極のそれぞれ、または一体となっている鋼材表面の部分によって、これに接する電解質（あるいは水、土壌などの湿性環境）の溶存酸素濃度にかんがりの差があるときには、溶存酸素濃度が高い電解質（または環境）に接する鋼の表面に電導性のある種の酸化物を生じ、電位の高い（貴な）酸素電極として働く。これに対し溶存酸素が低い電解質（または環境）に接する部分の鋼は電位の低い（卑な）鋼（鉄）電極として働く。両者が電池作用をするとき、前者がカソード（⊕極）、後者がアノード（⊖極）となって後者が腐食する。

図7 (b) に示すようにさびこぶの下にあたる部分に腐食によるえぐれ（孔食）が生じている（図7 (b)）。図8に模式図を示したが、水中の溶存酸素がさびこぶ以外のところにはよく供給されるが、さびこぶの下の部分には供給されにくい結果である*8。

通気差による電池（通気差電池）によって生じる腐食を、通気差腐食と呼ぶ。環境の不均一による腐食電池は他の種類のものも無いわけではないが、通気差によるケースが多い。

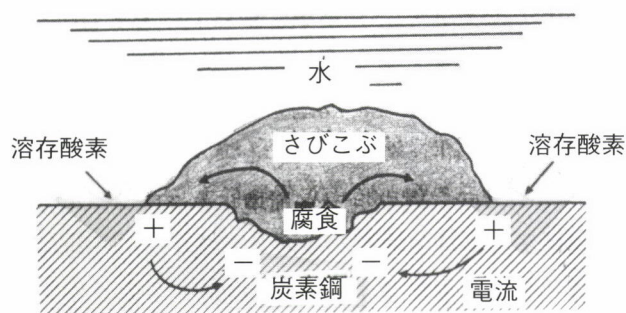


図8 さびこぶ下で生じる局部腐食の原理図

2.3 ミクロセルとマクロセル

いままでに述べた腐食電池では、⊕極と⊖極は目に見える大きさを持ち、位置も原則的に固定されたものであった。このような腐食電池をマクロセル（巨視的電池の意味）と呼ぶ。ところで、図2のようなマクロセルにおいて、ステンレス鋼を切り離して炭素鋼だけが海水中に存在する場合どうなるであろうか。この炭素鋼は均一であり通気差もなく、単独にマクロセルを構成しないものとする。

周知のように、この場合も炭素鋼は腐食する。それは鋼表面に原子の寸法程度の小さな⊕極と⊖極を作るためである。炭素鋼が実用的には均質であっても、表面の原子の配列には乱れがあり、不純物原子も存在する。この結果、エネルギー的に不安定な鉄原子が多数存在し、それらが⊖極、安定な部分が⊕極となって不安定な原子が溶け出すのである。溶解に伴って不安定な原子の位置は変わり、結局、全面がほぼ均一に溶けて行く。このような腐食電池をミクロセル（微視的電池の意味）と呼ぶ。⊕極と⊖極は目に見える寸法ではなく、位置も移動する。

重要なことは、ミクロセルによって腐食している炭素鋼が何らかの理由でマクロセルの⊖極になると、それによって流れる電流分だけ腐食が促進されるということである。

中性（pH5～9）の淡水や海水中での炭素鋼の腐食につい

て、マクロセルの影響を定量的に考えよう。このような腐食には溶存酸素が必要であるが、その水中濃度は常温で8～10ppm程度と低い。溶存酸素は水中を拡散によって移動し鋼表面に供給されるが、濃度が低いために単位時間当たりの供給量は限られる。他方、鋼が溶解しうる速度にはあまり制限はなく、溶存酸素が供給された分だけ腐食する。溶存酸素の供給が腐食の速さを律速しているのである。したがって、何らかの理由で溶存酸素の濃度が増したり、流速が生じて溶存酸素の供給量が増すと、腐食速度も増大する*9。

ところで、炭素鋼が溶存酸素の供給に見合って腐食しているとき、腐食が生じる位置はどこであってもよい。トータルバランスが合えばよいのである。ミクロセルの場合は腐食は全体が平等に受け持つ。マクロセルの場合は⊕極、⊖極の全体に供給された溶存酸素量に見合う腐食を⊖極が受け持つのである*10。

炭素鋼は腐食しやすいといっても、腐食が均一に生じれば常温の静止水（淡水、海水）中で1年間に0.1mm程度である。しかしマクロセルの形成によって全体に起こるべき腐食が⊖極にしわ寄せされれば、⊖極部分の腐食は何倍にも増大する。図2でステンレス鋼と炭素鋼の面積が等しければ、炭素鋼の腐食速度は単独のときのほぼ2倍になる。ステンレス鋼の面積が炭素鋼の2倍であれば、腐食速度はほぼ3倍となる。このように⊕極/⊖極の面積比が大きいほど、⊖極の腐食速度は大きくなる*11。

水中の炭素鋼に異常に深い侵食が生じれば、どこかに広い⊕極部分が存在すると考えるべきで、これを発見し除去することが、腐食対策の基本となる。

2.4 大気中での腐食

以上に述べたマクロセルの作用は、水中や土中のように、電流を通しうる腐食環境が十分な拡がりを持って鋼を取り囲んでいる場合に発揮される。例えば図2のように、⊕極と⊖極の間の環境中を電流が流れなければならないからである。

大気は電流を流せない。腐食は雨、露、その他の付着水、凝縮水が鋼表面に存在するとき起こるが、これらの水膜はごく薄いために電気抵抗が大きく、マクロセルに伴う腐食電流の流れる距離は短かく、電流値も小さい。

このため例えば大気中で炭素鋼にステンレス鋼がつながっていても、その影響は取り付け部の近傍に限られ、その作用も一般にはげしくない。

*8：図8を見て、図5ではなぜ通気差電池にならないのかと考える人がいるかもしれない。図5ではミルスケールは金属の一部のように働き、水が入らないのに対し、図8のさびこぶには水が滲透するので環境の一部を構成するのである。

*9：鋼の溶解速度にも上限があり、溶存酸素の供給が限度以上になると鋼の溶解は追いつかなくなり、不動態皮膜（3.1節参照）を生成して腐食速度は低下する。

*10：原則論である。

*11：説明は省略するが、これには限度がある。

2.5 酸による腐食

塩酸や稀硫酸、あるいはこれらが加わって $\text{pH} < 4$ となった水中では、溶存酸素にかわって水素イオン(H^+)が $\oplus$ 極において電子を受けとる主体となる $[\text{2H}^+ (\text{水素イオン}) + 2\text{e}^- (\text{電子}) \rightarrow \text{H}_2 (\text{水素ガス})]$ 。溶存酸素が存在すればそれも反応に加わるが、濃度的にはるかに多い水素イオンが主に反応して、中性におけるよりも急速な腐食を引き起こす。

この場合、上式では $\ominus$ イオンが生成しないように見えるが、 H^+ という $\oplus$ イオンが消費されているのであるからその分 $\ominus$ イオンが溶液中に残されるわけで^{*12}、 $\ominus$ イオンを生成しているのと同じである。

2.6 腐食割れ

鋼が腐食によって溶解するとき、均一に進行したり（均一腐食）局部的にえぐれたり（局部腐食、代表例：孔食）する以外に、鋼が割れるという腐食形態を生じることがある。主なものは、応力腐食割れと腐食疲労である。

2.6.1 応力腐食割れ

引張応力が加わっている炭素鋼は、ある種の腐食環境中で割れを生じる。引張応力といっても破壊強度以下の大きさである。したがって腐食環境のためにあたかも破壊強度が低下したような結果となるのである。引張応力は、外部応力でも溶接や冷間加工に伴う残留応力でもよい。このような現象を応力腐食割れといい、鋼以外の金属や合金にも起こる。応力が大きいほど割れやすい。

応力腐食割れは鋼以外の金属や合金にも生じるが、幸いなことに割れを引き起こす環境は金属や合金ごとに限られた種類のものであって、炭素鋼では熱い硝酸塩溶液や苛性アルカリ（苛性ソーダなど）溶液が代表的である。実務的には、硝酸塩系の肥料の煮つめ釜や、高温で比較的濃厚な苛性ソーダを扱う化学装置などに生じる。

割れは紙のように薄い限定された面が、腐食によって溶け去った結果として生じる^{*13}。このような特異な形態の溶解をもたらすものは引張応力である。応力腐食割れを生じる環境の腐食性はあまり大きなものではなく、全面の腐食はごく軽微である。ところが微小部分に引張応力が集中して鋼に塑性変形が生じると、その部分が活性となって溶解が起こる。割れが生成するとその先端は常に応力集中の場であり、その部分を $\ominus$ 極、割れの壁や割れの外の表面が $\oplus$ 極となって割れが成長して行く。

2.6.2 腐食疲労

ゼムクリップを伸ばして、何度も曲げると切れる。これは疲労と呼ばれる現象で、空気中で金属に繰返し応力が加わる場合が通常の対象である。腐食環境（種類に限定はない）中で金属に繰返し応力が加わると、亀裂を生じこれが成長して破断に至る繰返し応力の回数は、同一応力の場合、空気中より少なくなり早く破断する。また、疲労が生じないような低い応力の繰返しによっても、いつかは破断する。これを腐食疲労と呼んでいる。

疲労は応力によって結晶面に微少なすべりが生じ、これが繰返され集積する結果生じたミクロな割れが、亀裂へと発展して行くのであるが、腐食作用が共存すると亀裂の進展を妨げるような結晶内のミクロな状態を溶解によって解消するため、亀裂の進行がより容易になるのであると考えられる。

3 ステンレス鋼の腐食

3.1 ステンレス鋼の耐食性

ステンレス鋼は多くの環境中で、表面に不動態皮膜を自然に形成する。この皮膜は一種の酸化物でナノメートル程度と極めて薄い、金属が溶けてイオンになるのを抑制することによって耐食性を与える。中性溶液中で溶存酸素が供給されても、炭素鋼とちがって溶けようとしないのである。チタン、アルミニウム、クロム、ニッケルなども、不動態皮膜の生成により耐食性を示す^{*14}。

ステンレス鋼の不動態皮膜は、塩酸や稀硫酸中では溶けてしまい、耐食性は失われる。中性環境のほか、硝酸、濃硫酸、特に過酷でないアルカリ水溶液中などでは安定である。

ステンレス鋼が腐食するのは、不動態皮膜が不完全になるときである。塩酸や稀硫酸中では皮膜は全面的に溶けるが、本来耐食性を示すべき中性環境中でも局部的に皮膜が損われ、その部分を $\ominus$ 極、皮膜が健全な部分を $\oplus$ 極（溶存酸素の還元反応を行う）とする腐食電池を形成し、局部腐食を生じるという場合がある。

ところで、ステンレス鋼がしかるべき耐食性を示すための最低条件は、少なくとも12～13%のクロムを含有することである。ステンレス鋼には、その化学成分、ひいては金属組織のちがによって、オーステナイト系、フェライト系、マルテンサイト系、オーステナイト・フェライト二相系などいくつかの系統のものがあるが、いずれも12～13%以上のクロムを含んでいる。これらのうち最も多用されるのはオーステナイト系のものであるが、ここではそのなかでも代表的なSUS304を中心に述べる。

*12：もともと $\oplus$ イオンと $\ominus$ イオンの電荷の合計は同一（2.1節参照）。

*13：湿性硫化水素環境にある引張応力下の高張力鋼は、鋼表面の腐食によって生成した水素が鋼中に侵入することによって水素脆化を生じ割れに至る。このような割れを応力腐食割れに含めることがあるが、割れの生成は機械的なものであって、溶解によるものではない。

*14：銅や亜鉛は不動態皮膜を生成せず、表面にマイクロメートル程度の厚さの皮膜を生成して、溶存酸素をさえぎることにより耐食性を示す。

3.2 粒界腐食

SUS 304には0.05～0.07%程度の炭素が含まれているが、ある温度範囲で加熱されるとクロムと反応して、炭化クロム(Cr_{23}C_6)を主体とする析出物を生じる。析出が起こるのは主として反応性の高い結晶粒界である。加熱時間が十分であれば、結晶粒界に連続的に析出物が生じる。

ステンレス鋼の耐食性に寄与するクロムは、合金中に均一に溶けた状態(固溶体)になっていなければならないから、析出物を生じただけ有効なクロムが減少したことになる。析出物は結晶粒界に生じるからその付近でクロム濃度は局部的に低下し、やがては12～13%以下となる。こうなると結晶粒界は耐食性を示さない。このような状態になることを、鋭敏化と呼ぶ。鋭敏化したSUS 304を腐食環境で使用すると、結晶粒界が選択的に腐食する。これが粒界腐食である(図9 (a))。

SUS 304が鋭敏化する加熱条件を図10に示した*¹⁵。750～800℃で最も鋭敏化しやすく、約900℃以上では鋭敏化しない。

実務において鋭敏化が生じる原因は、主として3つである。SUS 304などを溶接すると、溶融線から何mmか離れたところが丁度鋭敏化しやすい温度に加熱され鋭敏化する。また、溶接や冷間加工後に歪取りのために熱処理することが多いが、加熱条件次第で鋭敏化する。完成品を鋭敏化温度で使用すると鋭敏化するの当然である。

鋭敏化は1000℃以上の高温で加熱ののち急冷すれば解消できるが、変形などが生じるのであまり実用的ではない。0.03%以上の炭素を含むオーステナイト系ステンレス鋼はすべて鋭敏化しうる。炭素量が0.030%以下のもの(例:SUS 304L)やチタンやニオブを加えて炭化物を作らせ炭素を固定したもの(SUS 321、347)は鋭敏化しにくい。

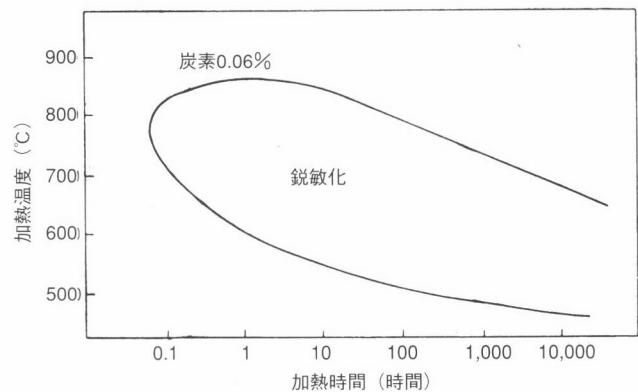


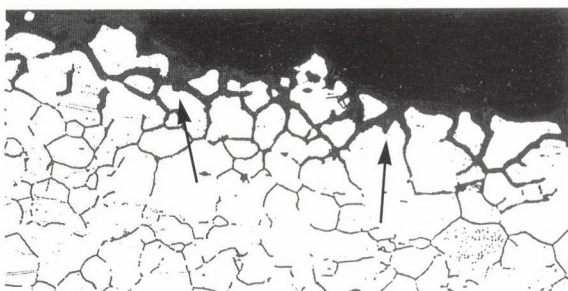
図10 SUS 304が鋭敏化する加熱条件(概念図)

3.3 孔食とすきま腐食

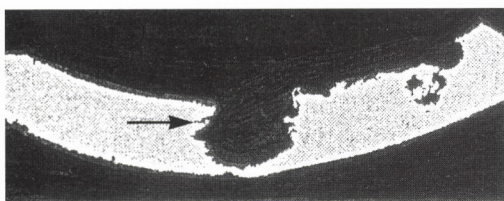
塩化物イオン(通称塩素イオン、 Cl^-)が環境中に存在すると、不動態皮膜は局部的に破壊されうる。例えば50℃の6%塩化第二鉄溶液*¹⁶にSUS 304を浸しておくと、数時間でかなり深い孔状の侵食が点々と生じる。これを孔食と呼ぶ。塩化物イオンによって不動態皮膜が破壊された個所が⊖極、健全な表面が⊕極となって侵食が進む。詳細は省略するが、腐食の進行と共に孔の中の溶液のpHは低下し塩化物イオン濃度も上昇するので、侵食孔内の表面は⊖極であり続ける。

SUS 304の孔食は、塩化物を扱う化学装置や塩化物イオンを含む水が滞留する配管内面などに見られる(図9 (b))。しかし、海水など塩化物イオンを含む中性水中では、むしろ次に述べるすきま腐食のほうが生じやすい。

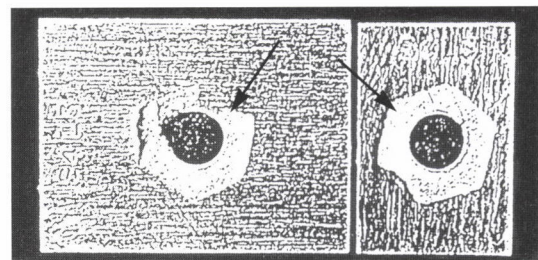
SUS 304の表面に貝などが付着したり、構造的にSUS 304や他の材料とぴったり重ね合せられた状態にあると、SUS 304と付着物、接触物との間に入った液体のpHが次第に低下し、



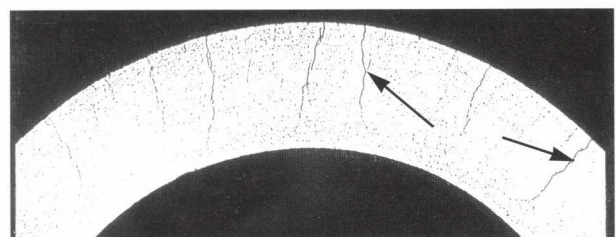
(a) 粒界腐食



(b) 孔食



(c) すきま腐食



(d) 応力腐食割れ

図9 ステンレス鋼に生じる種々の腐食(矢印が代表的腐食部)

*¹⁵: データの1例であって、絶対的なものではない。

*¹⁶: 促進試験溶液。 Fe^{3+} が溶存酸素と同様の作用を強力に行う。

塩化物イオンの濃度は上昇してすきま内表面の不動態皮膜を破壊するため^{*17}、すきま内表面を⊖極、すきまの外の表面を⊕極とする腐食電池が構成されて、すきま内の表面が腐食する。図9 (c) にボルト下でのすきま腐食の事例を示した。

SUS 304は孔食やすきま腐食を生じやすいが、鋼中のクロム量の増加と共に不動態皮膜が強化されて、耐食性は向上する。モリブデンや窒素が加えられると、耐食性はさらに良くなる。

3.4 応力腐食割れ

オーステナイト系ステンレス鋼は、塩化物イオンの存在下で応力腐食割れを生じうる。SUS 304の割れ感受性は大きく、中性水中に塩化物イオンが含まれていると、50～60℃以上で割れを生じた事例が多い (図9 (d))。塩化物イオンの濃度が高いほど割れやすいが、わずか10ppm程度 (水道水程度) でも割れうる。これは塩化物イオンが鋼表面に局部濃縮する場合であって、その原因としては孔食、すきま腐食の発生、伝熱面などでの水の蒸発による濃縮^{*18}などがある。

塩化物イオンが局部的に不動態皮膜を破壊し、引張応力の作用で限定された部分が面状に溶解して割れを形成するのは、炭素鋼の応力腐食割れ (2.6.1項) と同じである。

SUS 304の応力腐食割れ感受性は大きい、ニッケル含有量の多い鋼種はその量と共に抵抗性が増大する。

3.5 さび

建材など大気中で用いるステンレス鋼で問題になるのは、さびの発生である。その原因はやはり不動態皮膜の損傷である。ある種の清掃用薬剤や大気中のSO_xなどによる低pH物質の付着、海岸地帯での塩分の付着などが有害である。泥、すすなどが付着したままになっていると表面への酸素の供給が不足して不動態皮膜が不安定となるうえ、

これらの付着物には塩化物などの有害物質が含まれていることも多く、さび発生の原因となる。

ステンレス鋼の加工中や使用中に鉄粉が付着すると、それがさびて外観を悪くするだけでなく、さびが上記のような付着物と同じ作用をしてステンレス鋼自体がさびはじめる。SUS 304は使用条件によってはかなりさびる。

ステンレス鋼は表面をよく洗ってきれいにしておくときびにくい。海岸で雨に洗われず、堆積物が溜まるような条件では清掃は特に必要である。

一般にクロムが多くモリブデンなどを配合した鋼種は不動態皮膜が安定なため、発錆にも強い。

4 おわりに

腐食やさびは身近な存在ではあるが、その仕組みや因果関係を本質的に理解することは、専門分野の人以外にはかなり難しい。しかし、多くの人にとって腐食は他人事ではなく、もう少し全体が見えればとの希望が強い。

本稿は誌面の制限もあってこの目的を十分達してはいないが、ひとつの突破口になればと願うものである。興味を持たれた方々のために、末尾に入門書を挙げておく。

参考文献

- 増子 昇：「さびのおはなし」, おはなし・技術シリーズ, 1990, 日本規格協会
- 松島 巖：「錆と防食のはなし (第2版)」, Science and Technology シリーズ, 1993, 日刊工業新聞社
- 井上勝也：「さびの科学」, 三省堂選書61, 1971, 三省堂
- 腐食防食協会編：「金属の腐食・防食Q&A, 1988, 丸善
- 科学技術庁 調査所編：身近にある「さび」とその対策, 1986, 大蔵省印刷局

(1995年11月28日受付)

*17: SUS 304が溶存酸素をある程度消費するため、酸素の補給のないすきま内溶液の溶存酸素濃度が低下して、すきま内外で通気差電池ができる。それによるSUS 304の損傷は生じないが、この電池によってわずかながら塩化物イオンが運び込まれ、わずかに生じるクロムイオンによって、量の少ないすきま内溶液の液性が変化する。

*18: 外面から水で冷却する縦形熱交換器管の水面付近での蒸発による濃縮、塩化物を含む保温材を巻いた屋外蒸気配管に塩化物を溶かした雨水がしみ込んで、蒸発を繰り返すことによる濃縮など。



入門講座 鉄鋼プロセス編 -3

鋼の育ちがきまる—凝固 —結晶の生まれと成長過程—

高橋忠義 北海道大学名誉教授

Tadayoshi Takahashi

Solidification Factors for Controlling the Quality of a Steel Casting —Nucleation and Growth Process of Crystals—

製錬された溶鋼が強く、ねばい材料になる素地ができるのは、結晶が生まれ、成長する過程の凝固にある。

あたえられた合金の成分や冷却条件の中で、合金の液体が固体になるときに、自ら結晶の発達を調整し、収縮し、給湯を求めて、健全なる固体になるための努力をする。しかしゴール寸前に力つきて、割れたり、気孔欠陥などを発生する。我々はなにが原因で力つきたかを把握し、凝固が本来的にめざす努力目標を阻害しないように適切な手助けをすることが大切である。

1 結晶誕生の謎

1.1 サッカリンの合成

昭和19年に学徒動員で東京の駒込にある理化学研究所の有機化学の眞島利行研究室に配属された。(理化学研究所は大正6年に創設され、原子物理学の長岡半太郎、金属物性の本多光太郎、ビタミンの鈴木梅太郎の理研の三太郎をはじめ、サイクロトロン of 仁科芳雄の研究室からは幾多の俊秀が育ち、そのピークが湯川、朝永両氏のノーベル賞の受賞となった。)

戦時中のため砂糖がないので、甘味料としてサッカリン(砂糖の甘さを1とすると500倍といわれている)の合成をするようにいわれた。原書にかかれていた製造法をもとにトルエン($C_6H_5CH_3$)を原料として合成に入って約1週間後の最終段階で沈澱物を取り除いた透明な液体を大型ビーカーに得て、この中にサッカリンの結晶($C_7H_4NO_3SNa \cdot 2H_2O$ で溶性サッカリンともいうもので、常温での溶解量は $1g/1.2cm^3$ 水である)があらわれるのを待つことになった。

しかし結晶生成温度以下になっても結晶が生じないので、製造方法に誤りがあったのではないかと不安になった。そこでビーカーの液中の内面壁をガラス棒で擦ると結晶の発生が促進されるときかれ、真剣に擦るとなんと不思議なことに、その場所より北海道の冬の季節に稀に見ることができるダイヤモンドダストのようにキラキラと輝く細かい結晶が発生し、それが溶液全体に伝播して行くのを見た。

この神秘的な現象は充分理解することはできないが、興味があるので、疑問点とそれに対するこれまでの推論をのべておく。疑問として、何故、ビーカーの内面を摩擦すると、そこから結晶が発生し、それが結晶生成温度以下の過飽和状態の溶液全体にかなりの速度で、ある間隔をおいて、結晶の発生を逐次的に誘発し、伝播して行くのであるか。

最初の結晶の発生については、容器内面と擦る物体との間に密着と引き裂きの作用が交互にくりかえされ、核生成を容易にする活性な表面をさらすためである¹⁾。一方、誘発については摩擦の突き刺すような滑りの現象は、振動と同様の効果があって、液中に圧力変動を与え、このことが結晶生成を促進する。またある間隔をおいて発生するのは、一度結晶が生成すると、その近傍の過飽和度は減少するからである。その他に、一度溶液中に結晶が生成すると分子間の親和力の作用によって、溶液中の溶質元素を結晶面付近に引きつけて、局部過飽和をつくり、過冷度を大きくすることが、結晶の発生を容易にすると共に逐次的に生まれる可能性にもつながるとの考えもある。

1.2 過冷

1.2.1 急冷による方法

液体から固体が晶出する温度については、一般には純金属は勿論、いろいろな元素を含む合金にも一定の温度が示される。大気中で、比較的ゆっくり冷却すると液体の純アルミニウムなら $660^\circ C$ の一定温度で固体となる。このときの凝固温度は平衡凝固温度と呼ぶことができる。しかし凝固条件を変えると、特に冷却速度を早くすると、その速度に応じて平衡凝固温度以下の温度で結晶が生成する。この両者の温度差を過冷度という。

冷却速度を早めるとなぜ過冷するかを考えると、液体構造の原子配列を固体構造に変えるためには時間を要するもので、微視的な結晶の核になるものができあがる極く短い時間にどれだけ温度が下げられるかによって過冷する大きさが決まることになる。

質量のある場合には、急冷による方法で過冷度を増大さ

せるには伝熱性のために、限度があり、過冷度による材料の特性変化を系統的に追求するには適さない。

表1 希土類 (REM) の主な成分 (mass%)

C e	L a	N d	P r	S m	F e
4 6	3 5	9	4	0.5	1. 6

1.2.2 希土類元素による方法

希土類元素 (REM、表1) を溶銅に添加して、一回の溶解－凝固の処理法で炭素0.23mass%を含む約1.5kgの普通炭素鋼の溶銅を徐冷しても約100℃過冷させることに成功している²⁾。その際、REMを注入する管の材質、注入方法、注入量および溶銅を入れるるつぼの材質の選定が重要となる。特にREM注入管はAl₂O₃55mass%、SiO₂41mass%を含む磁性管が有効である。

これまで結晶生成には、結晶の生成を助ける何かが溶銅中に存在していることが知られているが、それがどのようにすればとり除くことができるかについては明確にされていない。

ここでのREM処理で、溶銅の酸素が減少することと、処理された溶銅から分離した反応生成物の中に含まれる元

素は溶銅と明確に相違していることが判明している。いずれにしても過冷度を100℃程度まで下げるまでの間に、結晶生成を助けるものが除かれていたことになる。ここで過冷中の溶銅の表面に酸素を吹きつけると、その瞬間に結晶を生成する。したがって結晶生成させる過冷度を、その材料が得ることができる最大過冷度の範囲内で自由に調節した銅が得られ、合金の種類による過冷銅の材料特性の関係が明らかになることが期待される。

1.2.3 過冷度と結晶組織変化

過冷度の小さい場合には、アルミニウムに銅を入れた合金でも、種々の元素が入っている銅でも、天からの手紙として知られる中谷宇吉郎が研究した雪でも、その結晶形態を支配する因子は限定される。合金では温度と濃度であるが、雪の場合はウサギの毛などの繊維のこぶを核発生に利用した温度と湿度の調整で人工的に美しい樹枝状品の結晶をつくり出している。

合金の過冷する度合いが大きくなると、生成する結晶は微細化し、ある限界の過冷度を越えると組織は一変して、液体の状態のものがそのまま凍結されたようになり、その後の冷却過程で過剰に含んだ成分が、アルミニウム－銅合金ではCuAl₂化合物 (θ 相) の粒状のものが均一に分布して析出する (図1-(c))。銅では球状に近い黒鉛の安定した

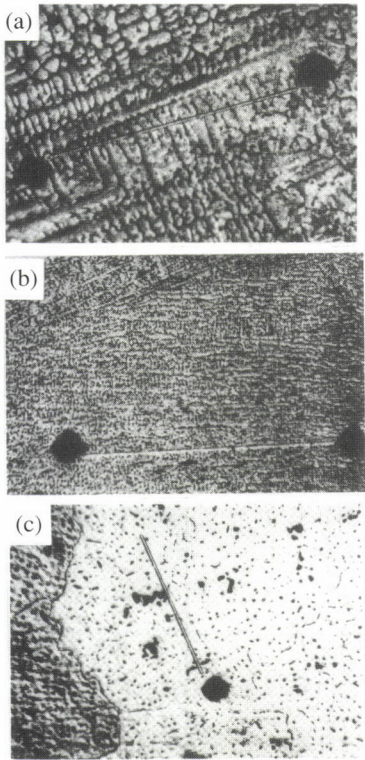


図1 アルミニウムに銅を4mass%添加した合金の過冷度と凝固組織変化 (a) ΔT=8℃：普通にみられる樹枝状の結晶組織で直線状の主軸に対してほぼ直角に側枝が見える (b) ΔT=31℃：やや過冷度が大きくなって結晶組織が微細化している (c) ΔT=138℃：結晶組織は一変して黒い斑点状の均一に分布する析出物 (CuAl₂のθ相) が見える

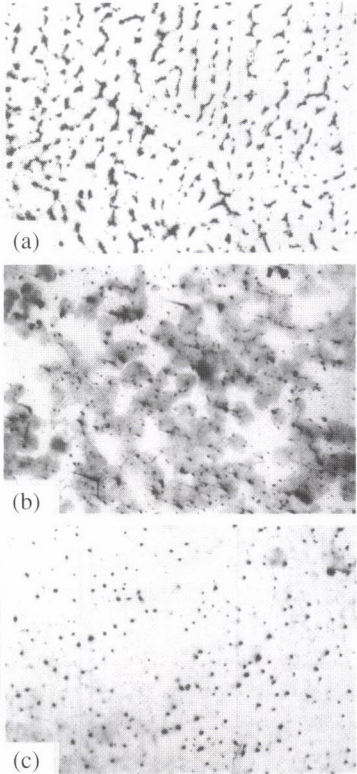


図2 希土類元素 (REM) を添加したFe-C合金の過冷度と凝固組織変化 (a) ΔT=60℃：結晶組織はかなり微細化している (b) ΔT=80℃：(a) と (c) の混在した組織になっている (c) ΔT=100℃：結晶組織が一変して球状の黒鉛が均一に分布析出している

析出物が見られる (図2-(c))。

大きな過冷度をつくるためには、前述した希土類元素などを用いて、かなり大きな過冷が出る液体をつくり、それを徐冷するのではなく、冷却を早める方法を加えると容易になる。

1.3 均質核生成と異質核生成

液体から結晶が生まれるとき、他の力を借りることなく、液体の中で固体として安定に成長するための核をつくり、それが結晶として成長することを均質核生成という。このことは大変に厳しいことで、普通の質量のある凝固条件では起こり得ないことである。純アルミニウムの融点は 660°C であるが、均質核生成するためには 130°C 過冷が必要であり、鉄の場合は 295°C の過冷となる³⁾。

ここで興味ある実験がある。若し液体金属の中に結晶生成を助ける物質が存在するなら、その含まれる数は有限であり、対象金属を分割して小さくして行くと、助ける物質の存在しないものもできると考え、それを実行して、加熱と測温ができる試料板の上に分割した球状の小試料をいくつも並べて溶かし、冷却する過程を上から顕微鏡でのぞくことによって、溶けた金属球の過冷する温度を把握している。温度の認知方法は液体から固体に変化するときに一瞬輝くことからできる。この方法で得られる最大過冷度は理論値とも一致している。

一方、現実の結晶生成は大きく過冷することなく生ずる。それは液体の中に含まれている固体粒子やるつぼの内面のでこぼこを利用して結晶生成エネルギーを小さくするからである。このような場合を異質核生成という。この場合の液体の中に含まれる固体粒子がすべて役立つものではなく、結晶の核となるものと原子配列が近似していることなどの条件の合致するもので、ぬれ性の良いものということになる。しかし結晶生成は単純ではなく、例えば液体と空気とるつぼの三接触点で結晶発生の有効な場所になっていることも興味ある現象である。さらに結晶の微細化を積極的に図るためにアルミニウムにチタンまたはチタンとボロンを添加することなどが行なわれて効果をあげているが、結晶微細化に関して、多くの合金に適用することが期待されるぬれ性の概念の前進が望まれる。

2 合金の凝固

2.1 溶質分配の利害-銅と半導体材料

純鉄 (Fe) に少量の元素、例えば炭素 (C) を加えた Fe-C 二元合金の炭素が溶質元素となる。

銅は鉄を基本元素として、多くの元素を含む多成分系の合金である。このような合金の液体から鉄原子を基本とす

る構造の結晶が生まれるときに、原子半径の異なることなどがもとで、液体から固体に変るとき溶質の移行が、同一濃度としてではなく、一般には制限を受け、溶質濃度の低い結晶を晶出する。この現象は銅塊をつくるときに成分元素が偏析するもとなる。

一方、半導体特性を示す、シリコン (Si) などの純度の高い単結晶をつくるときには、これに含まれている不純物の溶質は、凝固の末期に溶質が濃化することを利用して、この部分を切り取ると、材料の純度を相対的に上げることになり、この純化現象を繰り返すことによって、従来の再結晶法では到達できない高々純度のものが得られる。

2.2 平衡凝固と非平衡凝固 (実際の凝固)

平衡凝固とは合金の液体が温度が降下して、結晶を晶出する温度に達したときに、過冷することなく、結晶が生成し、この共存する液体と固体の溶質が充分拡散して、両者の平衡が保たれる制御された凝固である。この場合の温度と基本元素に加える溶質元素濃度をもととして、結晶生成における溶質の液体と固体への分配を示す平衡状態図は、二元合金のように比較的単純な場合については実験的に求められ、理論的には熱力学、統計力学によって明らかにできる。

二元合金が平衡凝固する場合の溶質の挙動を平衡状態図の模式図 (図3) によって説明する。

A成分100% (融点 T_0) のものにB成分が $C_0\%$ 合金されたとする。その組成で完全な液体状態のものが温度 T_1 までゆっくり降下すると結晶が晶出する液相線に達し、過冷することなく、 C_s の溶質濃度をもつ微小な結晶が生まれる。この際の C_s/C_0 の比を平衡分配係数 (K_0) という。

さらに温度が降下して、 T_2 になったときの液体と固体 (結晶) の存在割合は、 ab/ac 、 bc/ac となり、液相率、固

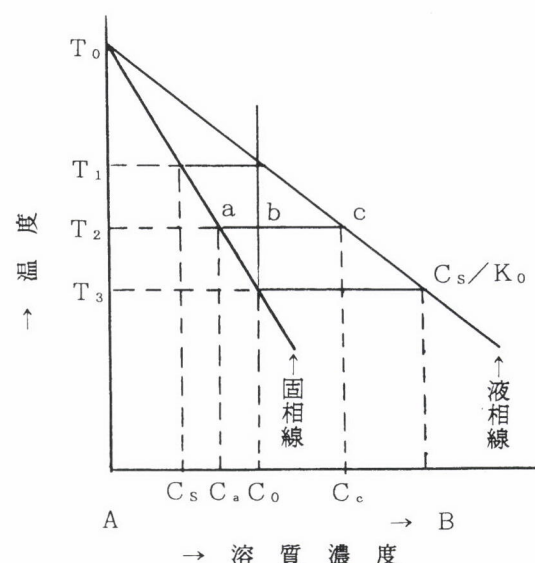


図3 平衡状態図の説明
横軸は母体元素Aに溶質となるB元素の添加濃度を示す

相率である。未凝固の液体の溶質濃度は C_L となり、固体の溶質濃度は C_S となる。 T_3 まで温度が低下すると全部が固体となり、初期の液体の溶質濃度と一致する C_0 となる。その最終の液体の溶質濃度は C_S/K_0 で示される。これらの関係は、液相線、固相線が直線となるときに成立する。

この結果から見れば最終的には溶質元素の偏りはなく、偏析は生じないことになる。このようになるのは、液体の溶質濃度が変れば、晶出する結晶の溶質濃度も変化し、それと同時にそれまでに晶出している結晶溶質濃度も、そのときに晶出する結晶溶質濃度に一致するように液体からの溶質の移行と結晶内の拡散とによって調整され、晶出した結晶のすべてが、界面の結晶と同じ溶質濃度に保たれるように変化するためである。

一方、非平衡凝固とは冷却速度が早くて、溶質の拡散、特に液体より困難な固体内の拡散が抑制される場合である。実際には平衡凝固とはかなり異なり、拡散の早い極一部の元素を除き、結晶の晶出時に含まれる溶質濃度に近い状態に保持された溶質分布が得られる。その両者の関係をアルミニウムに銅を4mass%入れた合金を例にして図4にて説明する⁴⁾。

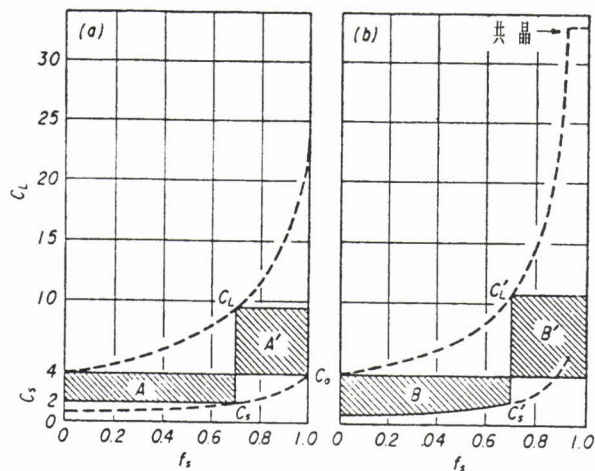


図4 平衡凝固 (a) および実際凝固 (b) の固相率 (f_s) 増加による液体の溶質濃度 (C_L, C'_L) と固体の溶質濃度 (C_S, C'_S) 変化

平衡凝固 (a) したときの固体の溶質濃度の軌跡は破線で示した C_S であり、最初に晶出した結晶の銅の溶質濃度は0.69 ($K_0: 0.174, C_0: 4\text{mass\%}$) であり、晶出する結晶に含まれる溶質量が少ないので、徐々に液体の中に溶質が濃化して行く、その軌跡が破線の C_L であり、 C_L の変化に応じて晶出する結晶の溶質濃度 (C_S) も増加する。

固相率 (f_s) 0.7のところでは、 C_L は約9mass%で、 C_S は約2mass%となり、それまでに晶出した固体はすべて2mass%となっていることを意味する。初期の平均溶質濃度は4mass%であるので、不足分はAの面積となり、その分、液体のA'に保有されていることになる。最終凝固では、拡散が充分に行われているので、全部が初期溶質濃度 (C_0)

の4mass%となって凝固を完了する。

実際凝固 (b) については、冷却速度が早くて、溶質の拡散が完全に抑制される場合についてのべる。凝固進行につれて晶出する結晶の溶質濃度 C'_S の変化は、凝固後の試料に分布する溶質濃度と一致する。特に固相内拡散が抑制されるために、例えば $f_s 0.7$ までに固相に移行した溶質量は少なく、補うべき溶質量の関係は (a) と比較すると $A < B$ であり、その分、液相への溶質の濃化が促進され、 $A' < B'$ となる。したがって C'_L 変化は凝固の後半に大きくなって、平衡凝固 (または徐冷) した場合には晶出しない、共晶 ($\text{Al}+\text{CuAl}_2$) が生成することになる。

この非平衡凝固の関係を平衡状態図と関連して理解することは凝固現象を理解する上で大切なことである。

この両者を結びつける考え方のポイントは実際凝固の C'_S の扱い方である。平衡状態図が成立している関係は、液体と固体の溶質濃度は平衡分配係数 (K_0) に対応して一定に保たれていることである。実際凝固では未凝固の液体の溶質濃度 (C'_L) は拡散し易いので、平衡凝固と同じように凝固進行過程で均一に変化すると見られるが、晶出した固体全体の C'_S は均一ではない。したがってそのままでは両者を対応させて状態図上に示すことはできない。そこで、ある固相率までの固体の溶質濃度分布の平均値をとって見

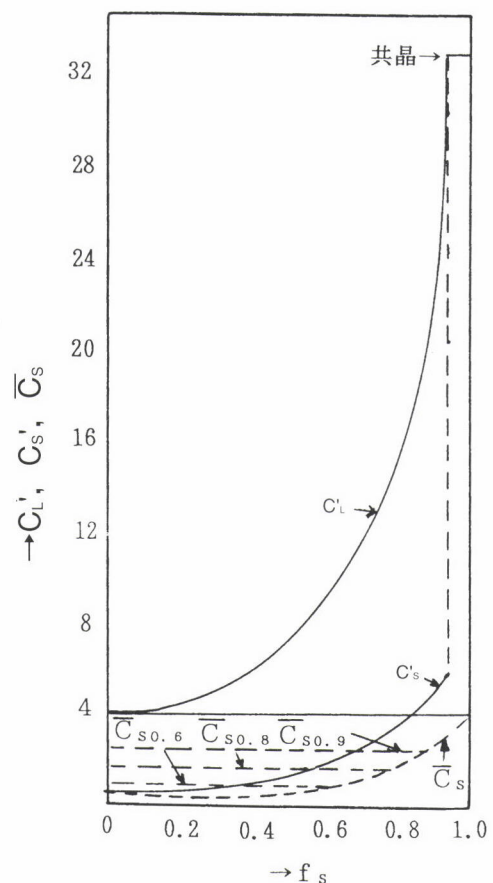


図5 実際凝固を平衡状態図に適合させる $\bar{C}_{S0}$ の求め方 (アルミニウムに銅4mass%を含む合金例)

掛上の平衡値を求める。これを $\bar{C}_s$ とする。この C_L 、 C'_s 、 $\bar{C}_s$ の三者の関係を図5に示す。ここで例えば固相率0.6、0.8、0.9の平均固相溶質濃度は破線のレベルの $\bar{C}_{s0.6}$ 、 $\bar{C}_{s0.8}$ 、 $\bar{C}_{s0.9}$ となる。この図の C_L 濃度を基準として、それに対応する $\bar{C}_s$ の濃度を平衡状態図上に示すと $\bar{C}_s$ の軌跡が得られる。アルミニウム-銅合金の平衡状態図の図6上に銅4mass%を含む合金の実際凝固に近い、冷却速度が早くて拡散が抑制されるとききの $\bar{C}_s$ の軌跡と、それにとまって、平衡凝固では生じない共晶が生成する関係を示した⁵⁾。共晶が出るまでに晶出する初晶 (α 相) の割合は2-3/1-3で、共晶量 (Al+CuAl₂) の割合は1-2/1-3となる。銅4mass%の溶質含有量の場合には、約7.5mass%の共晶が生成する。

さらに図6に示した C_L 、 C'_s 、 $\bar{C}_s$ の三者の凝固過程の関係を説明する。はじめの C_0 濃度の合金が液相線 (T_0) に達すると平衡状態図にしたがって C_{s0} の初晶を晶出する。さらに温度が降下して T_1 になると液体の溶質濃度は C_{L1} となり、それより晶出する結晶の溶質濃度はC点で示されるが、これまでに凝固した部分の溶質は、拡散が抑制されて、晶出した状態に保持されているため、平均値としては、C点濃度より少ないd点濃度となる。その際に共存する液体と固体の量的な関係は平衡凝固のときは、液相線と固相線の間のbc/ac、ab/acとなるが、実際凝固では液相線と $\bar{C}_s$ との間のbd/ad、ab/adの関係で示される。すなわち平衡凝固のときより液相量の残留が多くて、凝固が進んでいないことを意味する。平衡凝固なら C_0 の降下線と固相線との交点のe点で凝固が完了するものが、共晶が晶出する2点まで降下することになる。このように溶質の拡散の程度は凝固現象を大きく変化させることになる。しかし、鉄に炭素を加えた場合のように、炭素原子の半径が鉄に比して小さく、鉄の結晶格子の鉄原子との置換ではなくて、その格子間位置に

入る侵入型固溶体をつくるときには、拡散が速いので、冷却速度が速くても均一化が進み易い。

3 固体と液体の共存層

3.1 凝固遷移層

二元平衡状態図の液相線と固相線に凝固過程の凝固初期の温度分布 G_1 と凝固後期の温度分布 G_2 を重ね合せて示したものが図7である。凝固開始温度 T_L と終了温度 T_s にはさまれる凝固区間は G_1 に対しては Z_1 、 G_2 に対しては Z_2 となり、温度勾配がゆるやかになる凝固後期では凝固区間は拡大する。図8は銅の凝固開始点と凝固終了点の鋳型壁内面からの動きを示したものである。凝固時間と共に遷移する凝固開始点と凝固終了点との間の区間を凝固遷移層と呼ぶ。冷却速度の速い金型では凝固遷移層はせまく、砂型では凝固

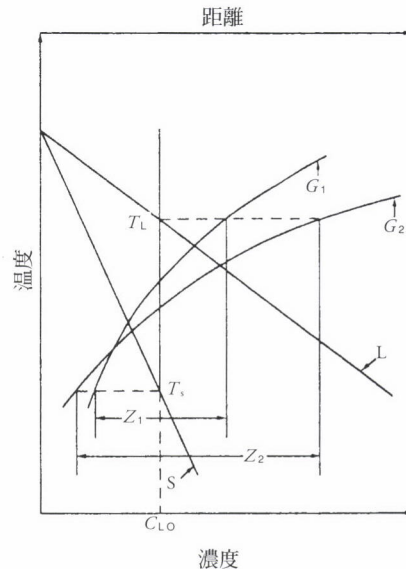


図7 二元平衡状態図による凝固初期と凝固後期の温度分布と固体と液体の共存層（凝固遷移層）の幅の変化の説明図

G_1 : 凝固初期の温度分布 G_2 : 凝固後期の温度分布
 Z_1 : 凝固初期の遷移層の幅 Z_2 : 凝固後期の遷移層の幅
 T_L : 凝固開始温度 T_s : 凝固終了温度
 C_{L0} : 平均溶質濃度 L: 液相線 S: 固相線

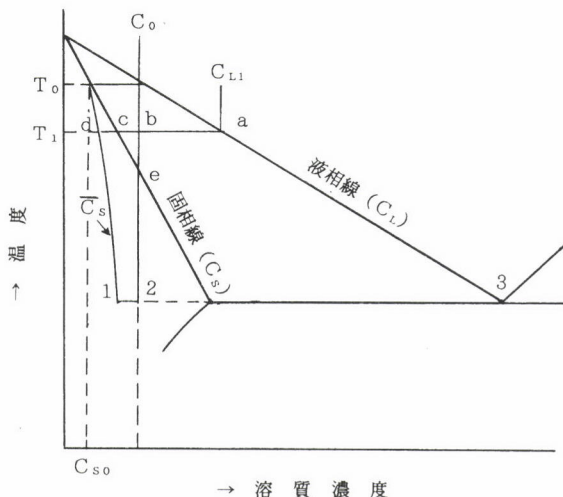


図6 実際凝固過程の平衡状態図上での説明

C_0 : 合金のはじめの溶質濃度
 $\bar{C}_s$: 実際凝固過程の平均固相溶質濃度変化
 (アルミニウム-銅二元系例)

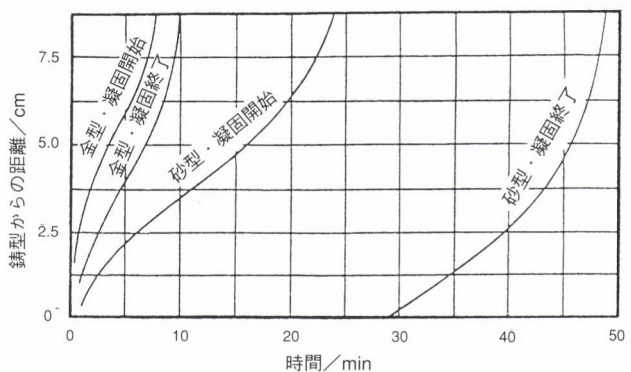


図8 0.6mass%炭素鋼の金型および砂型における凝固開始線と凝固終了線の推移 (175mm×175mm)

初期より大きく広がる。この凝固遷移層の広がり、は、鑄型の熱伝導率、合金の平衡状態図の液相線と固相線の温度落差、合金の熱伝導性、合金の凝固温度などに影響される。

一般に、この凝固遷移層を固相率0-0.3の最前線 (q_2 層) と固相率0.3-0.67の中間領域 (q_1 層) と固相率0.67-1.0の最終段階 (P層) の三つに分けられる⁶⁾。この分類した内容を説明すると、結晶が液体から生まれて液体の中で独立して存在している段階が q_2 層であり、結晶が発達して隣同士が手をつなぎ、固定されるが、その間にある液体は自由に流動することができる段階を q_1 層とし、P層は結晶がさらに発達して、結晶間に分散した液体は閉じこめられて流動することができなくなり、見掛的には固相のような状態の領域である。

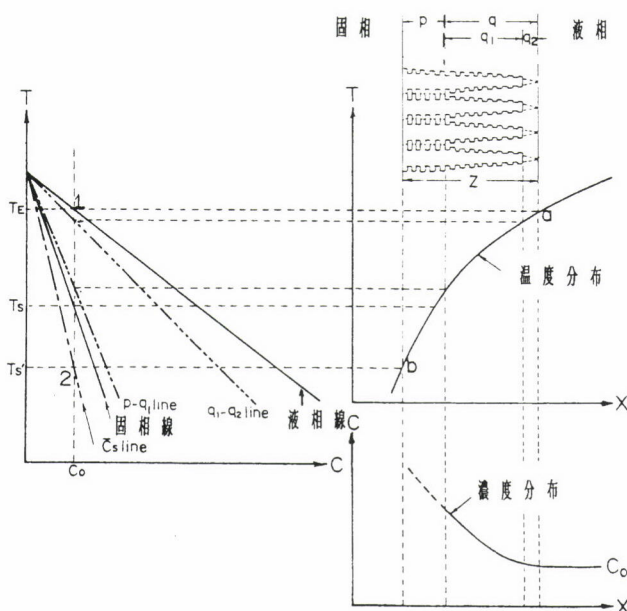


図9 平衡状態図 (左側)、実際凝固 (平衡と関連づけて左側)、鑄塊内の温度分布 (右側中央)、凝固遷移層の分類 (右側上段) とその層内の液体の溶質濃度分布 (右側下段) の関係

図9は、凝固遷移層を温度分布との関係で、模式的に示している。左側の図は、二元平衡状態図上に実際凝固における $\bar{C}_s$ 軌跡と q_1 - q_2 境界の固相率0.3と p - q_1 境界の固相率0.67を示している。右側の中段は鑄塊内の温度分布、下段は凝固遷移層内の溶質の濃度分布を表わしている。例えば、Al-2mass%Cu合金とすると、 C_0 の線の1の位置で凝固を開始し、2の位置 (固相線ではなく $\bar{C}_s$ との交点) で終了し、その温度レベルを右側に伸ばして鑄塊内の温度分布と交叉させると、凝固の開始位置aと終了位置bが決定できる。その幅が凝固遷移層となる。

q_2 層と q_1 層の境界固相率は、鑄塊の結晶組織によって変化し、冷却速度が速くて、結晶同士が柱状に並列して形成される柱状晶組織では小さく、冷却速度がゆっくりで、独立した結晶の発生が多い、等軸晶組織の場合には大きい。柱状晶と等軸晶の混在する、一般的な組織では0.3程度で

ある。 P 層と q_1 層の境界固相率は、通常0.67程度の値が適切であるが、鑄塊の中心部のように結晶組織の乱れる場所では決めがたい。

3.2 鑄造合金の流動性、強度形成、割れ感受性

q 層とP層の長さは、流動性、強度形成および割れ感受性に深く関係する⁴⁾。流動性の測定は一定温度で鑄込んだ金属が凝固するまでの間に、ときには複雑な鑄型でも十分にゆきわたることができるかどうかの能力を見極めるもので、それを決める基本的要素は q 層の幅に依存する。溶けた金属が速い勢いで流れるときに、でこぼこの結晶の突起が流動を阻害するので、 q 層が短くて、結晶が密に成長している方が抵抗が少なくてよい。

強度形成は凝固過程で、結晶が成長して互いに交叉し、連繋して試料全体として、外部からの力が加わっても抵抗を示すようになる時期を求めるもので、この状態は $\bar{C}_s$ の概念を導入して求めた実際凝固における p - q の境界となる。それより固相率が増加すると徐々に強度をあげて、完全に凝固する固相率1で強度が急上昇する。

割れ感受性は強度形成の p - q 境界から固相率1となる完全凝固するまでの区間の長さが重要な因子となる。この区間は液体を共存しているため、強度的に弱く、区間が長い程、結晶間に分離が生じ易い。したがって、肉厚の差のあるものや、形状の複雑な場合の凝固過程では、収縮の仕方に差が生ずるための熱応力を受け易いので、区間の長いものを取り扱うときには、凝固条件を十分に検討しなければ、凝固過程で割れてしまうことになる。

3.3 結晶間偏析にもとづくマクロ偏析の発生源

凝固後の鑄塊の切断面について、結晶の発達形態や成分元素の偏析の状況などが検知できる。結晶が生まれ、成長する過程は主に樹枝状に主軸が前進して一定間隔をおいて側枝を出して発達する (図1の過冷度の小さい場合)。同時に前述したように溶質の分配が行なわれて、結晶の側枝の間に溶質成分が濃化する。これがミクロ偏析となる。一方、樹枝状結晶 (デンドライト状結晶) は冷却速度が遅くなると、主軸の並列的な成長が乱れて隣接する結晶間に空間ができて、その空間が溶質濃化液の溜り場になる。かかる凝固時期は q_1 層の発達段階であり結晶は固定されはじめるが、その間の液体は自由に流動できる領域であり、かつ q_1 層は固相率約0.3から約0.7まで結晶成長するため、その間に、溶質元素は平衡分配係数にもとづいて液体と固体に分配され、デンドライト間の液体に溶質が濃化する。この濃化する溶質元素の種類によっては、もともとの液体の密度を軽くしたり、重くしたりすることになる。そのため q_1 層がP層に移行するまでに、時間的に余裕があるときには、

結晶間の液体が浮上または沈降する現象が生じ、溶質が濃化した液体の流動の軌跡が、凝固後に棒状などの体積を有する有害なマクロ偏析を形成することになる。したがって、凝固条件によっては、材料特性のみでなく、予測される q_1 層の移行速度にもとづく、偏析上の要素も考慮に入れた、成分元素の総合的な調整をすることが、健全な鋳塊をつくるために必要なことである。

4 健全な鋳物をつくるポイントは給湯ルートの確保

合金鋳塊の凝固過程では一般に液体—固体変態にともなう体積減少（初晶の晶出段階では低炭素鋼は約4%、アルミニウム—銅3mass%は7.5%）を主な要因として、さらに液体、固体の温度降下による体積収縮も加わり、それを補うために、凝固進行速度に応じた給湯を常に必要とする。必要な給湯が得られがなくなると、引き込むための負圧が増大して、気孔の核生成負圧値を越えると気孔が生成し、鋳塊の健全性を阻害する大きな要因となる。したがって温度が降下して結晶が成長する過程で必要とする給湯の状況を明確に知っておくことが大切である。

円柱状鋳型の側面より冷却したアルミニウムにシリコン3mass%を合金した800gの試料について、凝固過程の液体と液体—固体の共存層（ q 層と P 層に区分）および晶出した固体の三者の温度降下による体積収縮と液体—固体変態にもとづく体積収縮とに要する給湯量とを分別して、全体

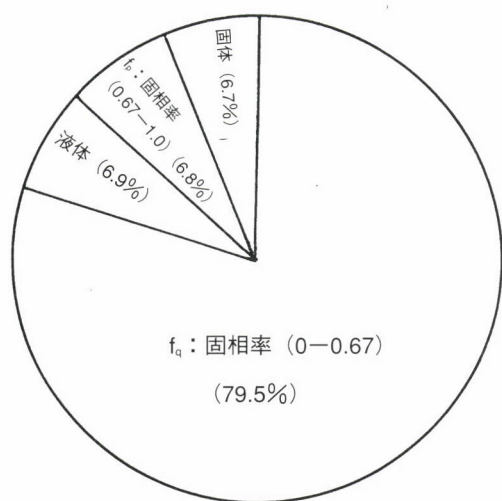


図10 凝固過程の収縮補填の給湯の必要度

固体：凝固開始から終了までの温度降下にもなう固体の体積収縮
 液体：凝固開始から終了までの温度降下にもなう液体の体積収縮
 f_0 ：固相率0から0.67までの液体—固体変態にもなう体積収縮
 f_1 ：固相率0.67から凝固終了までの液体—固体変態にもなう体積収縮

の給湯量に対する割合で示したのが図10である。

凝固過程の液体および固体自体の温度降下による収縮分の給湯割合は6.9%と6.7%であり、さらに固相率0.67-1.0の P 層も前二者と同様の6.8%で、見掛け上、固体と同じような挙動を示し、給湯できない状態になっている。

給湯を最も必要とする時期は、凝固初期から固相率0.67までの範囲の q 層領域を通過するときである。したがって、この時期に必要な給湯が急速、かつ連続的に行える補給ルートが確保されていなければならない。

給湯源としては、鋳塊上部にもうける押湯、または鋼などの連続鋳造では、注入される溶湯金属である。押湯でも、注入溶湯でも、給湯を必要とする場所にとどくまでのルートが固相率0.4以上になると、その層内を通過する液体の透過率²⁾（例えば、井戸に水の溜まり易さは、砂礫の間を水が通ってくるので、その層の緻密性が関係する。これを透水性と呼ぶ。金属では砂礫のかわりに結晶成長層が対応し、その発達状況に關係する。）が低下して、通りがなくなり、給湯能力が低下し、負圧が増大して、その結果としてパイプ、気孔、ザク巣などの欠陥発生の最大の要因となる。

5 おわりに

溶鋼をより適切な状態で凝固させるためには、伝熱、対流、結晶生成形態などの知識の他に固体と液体とが共存する層の動的な物性変化などについても知識を深めると共に、鋳造する溶鋼の性状を知り、かつ凝固後の材料の加工や熱処理工程および使用目的などをも把握していることが必要である。

参考文献

1. B. Chalmers : Principles of Solidification, (1964), p. 87 (John Wiley and Sons)
2. T. Takahashi, M. Kudoh, K. Ohsasa and J. Tanaka : Trans. ISIJ, 27 (1987), p. 936-939
3. D. Turnbull : J. Appl. Phys., 21 (1950), p. 1022-1028
4. 第110・111回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編：鋼の凝固と鋳造プロセスの最近の進歩, (1986), p. 18-19
5. 高橋忠義, 工藤昌行：日本金属学会会報, 11 (1972), p. 601-603
6. 第4回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編：凝固に関する基礎的諸問題, (1969), p. 22-29
7. 高橋忠義, 工藤昌行, 永井慎一：鉄と鋼, 68 (1981), p. 623-632

(1995年12月25日受付)



鉄の歴史③

遺物が語る古代日本の鉄

佐々木 稔

元新日本製鐵(株)先端技術研究所

Minoru Sasaki

Relics Excavated from Ruins and Tomb in Ancient Japan "Teach" Us the History of Iron and Steel Production

1 はじめに

鉄鋼協会の会員の中でも、とくに中堅・若手の方々が「鉄の歴史を知りたい」といわれる場合、その動機はどこにあるのだろうか。ごく普通に「産業技術史として学ぶ」ということかも知れない。しかし筆者が思うに、少なくとも人達の中に社会の大きな変動期を迎えて歴史から何かを学びたいという気持ちが起こって、古代史あるいは中世史の書籍を買い求め、読み始めているのではあるまいか。

ところが手にする歴史書には、日本の鉄の歴史に関する事項は、まったくといっていいほど記述されていないであろう。古代・中世の鉄の歴史は、実は考古学・文献史学・金属学が複合する今日的な研究分野になっており、一般の解説的な歴史書で取り上げるには難しいのである。

本稿では古代日本の鉄を金属学的立場から扱うので、あくまでもデータをベースに解説することになる。筆者の見解を挿入できたとしても、全体のせいぜい3割程度に過ぎない。表題に“遺物が語る”の修飾句を入れたのはそのためである。当然のことながら、読者が筆者とは違った見解を遺

物に“語らせる”のは、まったく自由である。むしろ筆者としては、読者各位がそれを試みて下さることを期待したい。

2 使用初期の鉄器

最古の鉄器は縄文晩期(BC4世紀頃)で、福岡県下の遺跡から出土している(図1a))。板状鉄斧と呼ばれる小型の斧の頭部破片とみられる。次にやや大きな斧の一部が弥生前期初頭(BC3世紀頃)の熊本県の遺跡で見つっている(図1b))。これら2点が出土した九州西北部は、水田稲作がいち早く導入された地帯でもある。採取した錆片のミクロ組織を筆者らが観察したところ、ともに元の鋼の結晶組織の痕跡が認められた(化学組成は表1のNo.1)。しかし考古学者によっては形態上これらを鍛造鉄斧に分類しており、また錆片の採取範囲が狭く試料量も少ない(後者でも0.数グラム程度)という指摘があって、鍛造品ではなく鍛造鉄炭鋼製品(注1)と推測する研究者も多い。なお、鍛造製品として確認された鉄器の中では、山口県下出土の鋤先(弥生前期後半、BC2世紀頃、図1c))がもっとも古く、採

表1 弥生・古墳時代の鉄器の化学組成例

NO	出土地・遺跡名	遺跡年代	鉄器の形状・種類	採取試料		化学成分(%)						推定炭素量(%)	鍛造組織あるいは非金属介在物
				個所	状態	T.Fe	Cu	P	Ni	Co	Ti		
1	熊本県天水町、斉藤山遺跡	弥生前期初頭	鉄斧	胴部	錆片	60.5	<0.01	0.04	—	—	0.12	0.2~0.3	検出されず
2	山口県豊浦町、山の神遺跡	前期後半	鋤先	刃部	—	55.64	0.605	0.472	—	—	—	—	元はねずみ錆鉄
3	大分県中津市、森山遺跡	中期中頃	鉄斧	側部	—	56.49	0.077	0.609	0.015	0.009	0.087	—	黒芯可鍛錆鉄か
4	熊本県阿蘇町、池田遺跡	後期後半	小鉄片	端部	—	58.58	0.004	0.037	0.001	0.003	0.049	—	元は白錆鉄
5	福岡県春日市、赤井手遺跡	後期前半	棒状鉄*	断面	メタル	—	0.20	0.16	0.021	0.023	nil	(分) 3.52	ねずみ錆鉄
6	“ “ “	中期末	板状鉄*	断面	—	—	0.017	0.022	—	0.012	nil	(分) 0.82	共析鋼に近い
7	長崎県大村市、富の原遺跡	中期後半	無樋鉄戈	刃部	錆片	59.9	0.005	0.422	0.000	0.000	0.038	0.5~0.6	非晶質珪酸塩
8	福岡県春日市、門田遺跡	中期後半	有樋鉄戈	棟部	—	51.3	<0.005	0.078	—	—	0.071	0.1~0.2	“
9	奈良市大和6号墳	5 C中頃	鉄剣**	断面	メタル	—	0.019	0.023	0.14	0.041	0.004	(分) 0.22	ウスタイト、ファヤライト
10	埼玉県行田市、稲荷山古墳	5 C後半	鉄剣	棟部	錆片	—	0.35	Mn:0.18	—	—	<0.01	0.2~0.3	非晶質珪酸塩
11	福岡県刈田町、番塚古墳	5 C末	鉄斧	側面	—	60.17	0.114	0.050	0.049	0.014	0.010	0.2~0.3	“
12	奈良県明日香村飛鳥寺塔心礎下	飛鳥時代	挂甲小札	破片	—	58.8	0.07	0.119	—	—	0.013	0.1~0.2	ウスタイト、ファヤライト
13	茨城県協和町、小栗地内古墳	6 C末	鋤先	断面	—	59.69	0.185	0.142	—	—	0.014	0.1~0.2	ファヤライト
14	茨城県桂村、高根古墳	7 C中頃前半	蔵手刀	中央	—	61.02	0.104	0.033	—	—	0.010	0.1~0.2	非晶質珪酸塩

注1) *は大沢正己氏、**は久野雄一郎氏による。これ以外は筆者が共著の報告・論文から引用。

注2) 始発原料鉱石を磁鉄鉱と判定可能な含有量レベルを越している数字には網かけをした(本文参照)。

注3) (分)は化学分析値。推定炭素量は黒錆層のミクロ組織の観察結果にもとづく。

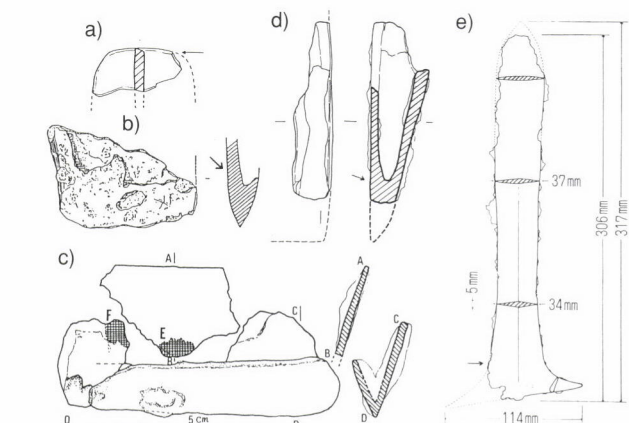


図1 弥生時代の出土鉄製品の計測図例
a)福岡県二丈町曲り田遺跡出土板状鉄斧（縄文晩期、斧の頭部）、b)齊藤山鉄斧（刃部）、c)山の神鋤先（刃部）、d)森山袋式鉄斧（側部）e)富の原鉄戈。b～e)の出土地と年代は表1を参照。矢印ならびに網掛け部は試料採取箇所を示す。

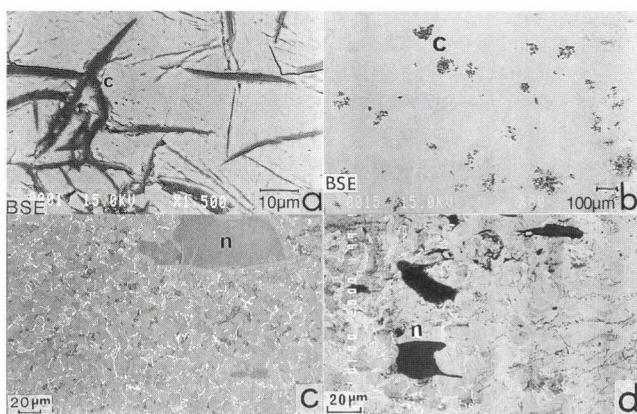


図2 鉄器鍔片試料のミクロ組織
a) 山の神鋤先、b) 森山袋式鉄斧、c) 富の原鉄戈、d) 稲荷山鉄剣。出土地と年代は表1を参照。a、b、d)は反射電子線像。符号cは炭素（EPMA分析で確認）、nは非金属介在物。鉄戈と鉄剣の組織に見られる明色の網目状物質はセメントタイト。

取した鍔片試料のミクロ組織観察では片状黒鉛が確認された（図2a）。化学組成は表1のNo.2に示した。

注1）表面層の脱炭処理を行い、鑄鉄製品に靱性を付与したもの。すでに古代の中国で開発されており、出土した農具について中国の金属学研究者による報告がある。同様に、加熱処理によって黒鉛を球状化した例は、わが国では鉄斧について確認されている（図2bならびに表1のNo.3参照）。

最古級の鉄器の形態学的分類法ならびに金属学的材質判定法は、他の分野の問題とも関連して非常に重要である。これらの鉄器が、①華北で製作された鉄器が陸路朝鮮半島を縦断して南に運ばれたあと九州西北部にもたらされたのか、それとも②華中から海路を経て朝鮮半島西南部に到りそこから伝えられたのか、ということである。これは中国大陸からのイネが辿った伝播のルートと無縁ではないと考えられている。

3 弥生時代の鉄素材と鉄器製作技術

各時期毎の出土鉄器の種別数量分布の調査結果によれば、

農工を主体にした鉄器は弥生前期後半に九州全体ならびに瀬戸内沿岸部と近畿地方の一部に広まり、中期後半になると東海・北陸から関東・東北地方にまでも拡大し、後期には農具の鉄器化が西日本でほぼ完了したといわれる。鉄製品の増加の原因は明らかに水田稲作の普及と密接に関係している。しかしそれだけでなく、交易の拡大や移住してきた人達の増大の要因も考慮することが必要と思われる。

鉄器の製作について、鉄鑢（やじり）のような小型品は弥生前期後半に行われたとする見方がある。しかし鉄素材と推定される鉄片が出土し、また列島内に独特な袋式（木製の柄をはめ込むソケット状の部分）の鉄斧や大型の鉄戈が現れるのは、中期になってからである。農具の鉄器化完了の影響もあり、後期を製鉄開始の時期とする意見が考古学者から依然として強く出されている。

3.1 鉄素材と鋼精錬の実施

鉄素材とは鉄器を製作するための材料の意味で、考古学の方で広く使われている。当時すでに中国では間接製鋼法が行われていたので、鉄素材が製造されたとすれば半製品の鉄鉄と鋼である。日本列島に搬入されたのは、両者かあるいはその一方であろう。鉄器の鑄造が確認されるのは奈良時代に入ってからであり、それよりも前の時代に鉄鉄が利用されたとすれば、精錬して鋼に変える以外にない。後者の鋼素材は鍛造・成形して、鋼製鉄器の製作に用いられる。ところが鉄関連遺物の調査で鉄素材と確認された例は決して多くない。製品鉄器の形状をとらないため、発掘調査でしばしば“不明鉄器”として分類されることがその原因である。

中期末（AD1世紀頃）以降の出土になるが、板状・棒状の“不明鉄器”の代表例を挙げて検討してみよう。図3a)は厚みが均一な薄板で、破断されて三角形になっていることから、“三角形鉄片”の名称がある。元は帯板状であったと推定される。鍔が進んで全体が黒錆化している。図3b)は断面が円形の丸棒で、メタルがよく残った遺物である。これらの“不明鉄器”の金属学的解析結果から、前者の元の

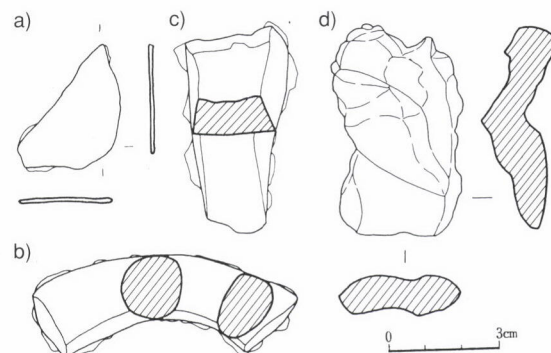


図3 鉄素材と推定される遺物の計測図
a) 池田遺跡出土小鉄片、b) 赤井手遺跡出土棒状鉄、c、d) 同左遺跡出土板状鉄。出土地と年代は表1を参照。

材質は白鑄鉄、後者はねずみ鑄鉄であることが判った（化学組成は表1のNo.4、5参照）。一方、図2c、dは形状が不整、厚さは不均一であり、規格品とはいえない。板状の素材cの炭素分析値は0.82%（表1のNo.6）で、利器の刃金に用いるような銅（炭素量0.4～0.86%）の部類に入る。

注2）中国では古くは春秋戦国時代の鑄型（板材范・棒材范）が発見されており、鑄造製品の寸法はいろいろあることが報告されている。韓国ではまだ出土が見られないようである。

これらの鑄鉄半製品は鑄物用ではなく、炭素分低減の処理を行って銅を製造するための材料と考えられる。銅精錬の遺構は未検出であるが、この工程で生成する独特の形状の鉄滓は他の遺跡で出土している。今後鉄滓を解析して、この時代に列島内で銅精錬が行われたことを間接に証明することは可能と思われる。その場合、「中国では紀元2世紀頃から脱炭材として鉄鉱石粉を添加する銅製造法が行われた（北京科技大韓汝玢教授）」事実を考慮して、大陸の新しい技術が速やかに伝えられたかどうか、検証することが重要であろう。

鉄に関する文献資料としてよく引用される『三国志』魏書東夷伝弁辰の条には「国、鉄を出す、韓、濊、倭みなしたがってこれをとる」とある。この史書が書かれた3世紀初頭に朝鮮半島南部では製鉄が行われていたが、“倭”では弥生後期になっても、依然として鉄素材を列島外から搬入していたことを物語っている。板状・棒状の鑄鉄半製品であれば精錬して銅に変え、また板状の銅素材ならばそのまま鍛造鉄器の製作に使用したであろう。ここで問題が残るのは交易品としての素材の規格性である。少なくとも図1c)、d)に示されるような銅素材には、それが見られない。次の古墳時代に現れる鉄鋌の形では、まだ流通していなかったのかも知れない。文献資料を裏付けるためにはさらに詳細な研究が必要である。

3.2 大型鉄戈にみる鍛造技術

列島内で製作したと考えられている大型の鉄器に、刃長が数10センチにも達する鉄戈がある。九州の西北部を中心に、中期後半の遺跡から約20振りが出土している。実用性はなく、儀器として使われたものと考えられている。鉄戈には無樋と有樋の2種類があって、ここでは前者の代表例を図1d)に示した。

鍔片を採取して金属学的調査が行われた鉄戈の資料数はすでに8点に及ぶが、代表例につき化学組成ならびにマイクロ組織の分析結果を表1のNo.7、8に、また鍔びる前の銅の結晶組織を推定することができる視野を、図2c)に示した。このような組織からもとの銅の炭素含有量を見積もってみると、鉄戈の刃部では推定炭素量が0.5～0.6%、棟部では0.1～0.2%になった。硬、軟の銅片を鍛着して長く延ばし、軟銅が外側になるように折り返して造形したのと考えられる。この製作法は、板状鉄斧はもちろん剣でも基本的に同じである。

ここで、鉄戈の材質について若干説明しておきたい。古代の鉄関連遺跡から出土した砂鉄のP含有量（0.0数%以下）から、それを始発原料に鉄鉄を経由して間接に、あるいは直接に銅を製造したと仮定した場合に、銅中のP分が0.1%を越すことはないかと筆者は考えている。二振りの鉄戈の鍔片試料の化学組成は表1のNo.8、9を示したが、Pの分析値はそれぞれ0.422、0.078%である。前者は明らかに磁鉄鉱が始発原料である。後者も砂鉄の可能性は少ない。前節では触れなかったが、棒状の鉄素材はPが0.16%で明らかに磁鉄鉱が原料といえる。しかもCuの含有量が多いので、磁鉄鉱には銅鉱物を伴っていたことが分かる。一方、“三角形鉄片”はPが少なく原料を磁鉄鉱と判定することはできないが、砂鉄とする根拠はまったくない。鉄戈に使用された銅もしくは元の鑄鉄素材は、すべて列島外から搬入されたものと考えて間違いのないであろう。

注3）筆者は、東アジアの鉄鉱床の品位を調査した報告書⁹⁾やその他の資料をもとに、鉄製品中のPだけでなく、Cuについても0.1%、NiとCoであれば0.0数%を目安とし、それ以上含有されている場合に始発原料を磁鉄鉱とみなしてよいと考えている（表2参照）。ただし鉄鉱床の組成が不均一であるため、鉱石採掘個所の違いによって、これ以下の含有量でも磁鉄鉱の場合があり得る。赤鉄鉱には標識成分がない。また砂鉄では製錬の工程においてTiO₂分がスラグ側に移ってしまい、TiO₂は標識成分として利用することができない。

鉄戈のマイクロ組織には非金属の微小な遺物が認められる（図2c参照）。製鉄史研究の分野では現用銅と同じ非金属介在物の名称で呼ぶことになっているので、読者には注意していただきたい。古代の銅精錬法では、分離しきれなかった少量の鉄滓がメタルの中に残ってしまったものである。介在物の組成から銅精錬法の基本に係わる事柄が分かるが、これについては次章で述べることにしたい。

3.3 製鉄炉跡判定の金属学的根拠

製鉄の遺構は弥生時代の全期間を通して発見されており、また銅製鉄器の金属学的調査から始発原料鉱石が磁鉄鉱と推定できる場合はあっても、砂鉄使用を裏付ける直接・間接の証拠は見つけることができない。

現在のところ正式な報告書に製鉄炉跡と記述され、また新聞紙上でも大きく取り上げられているのは、ただ一つ広

表2 古代の鉄生産に関係のある磁鉄鉱の鉱山と鉱石の化学組成

NO	鉄鉱山もしくは鉄関連遺跡	化学成分 (%)					微量成分	
		T.Fe	Cu	Mn	P	TiO ₂	Ni	Co
1	韓国忠州鉱山	55.90	0.006	—	0.042	0.13	(ppm)	
2	達山鉱山採集品	50.96	0.005	0.51	0.033	0.06	<48	0.61
3	中国山東省金峯鉱山	58.88	0.276	0.17	0.111	1.16		
4	江蘇省利国鉱山	60.90	0.065	0.26	0.026	0.03		
5	滋賀県牧野鉱山	40.03	—	—	0.033	—		
6	野路小野山遺跡出土	69.04	0.012	0.20	0.007	0.44	<640	39

注）No.2,6は『国立歴史民俗博物館研究報告第58、59集』より抜粋。「採集品」は鉱山で採掘した鉱石ではなく、地表面で採取されたものと思われる。微量成分は中性子放射化分析法による。

島県三原市の小丸遺跡だけである。時期は3世紀とされているが、これに対して疑問を述べる考古学者もいる。しかし年代比定は純粋に考古学の分野の問題であり、金属学系の研究者は立ち入るべきではないと筆者は考える。

報告書によれば遺構としては地面を掘り窪めて作った火窪炉跡（内径40～45cm）だけで、上部の炉壁構造は残っていない。炉の近傍（B地点）からは塊状鉱石が出土し、それは「平均」と「硬い部分」に分けて分析された。それぞれT.Fe；20.76, 40.08, MnO；16.30, 8.78, SiO₂；29.68, 18.86（%）という結果が示されている。一方、同じ地点の出土鉄滓の化学組成範囲は、T.Fe；26～36, FeO；13～40, MnO；7.5～11, SiO₂；27～33（%）になる。報告者は、この種の塊状鉱石を破碎、「硬い部分」を選別し、製鉄原料として使用した可能性が大きいと述べている。結果としてこの金属学的解析は、遺構を製鉄炉跡とみる考古学的見解を補強することになった。

上記の組成は、鉄鉱石というよりはむしろ鉄マンガン鉱に近く、近現代の製鉄法で主原料として使用した例は見当たらない。この種の鉱石は鉄分が少なく、またCOガスによる被還元性が低いことがその理由であろう。一方、手捏ね粘土を積んで構築するシャフト炉の復元を、火窪炉の内径をもとにして行うならば、炉高は1mにも達しないであろう。そうした高さの低いシャフト炉に装入し、製錬することを目的に鉄マンガン鉱が採掘・処理されたのかどうか、検討の余地があるように思われる。

なお、福岡県添田町庄原遺跡の遺構は製鉄炉跡として期待が持たれるもののように新聞で報道されたが、発掘調査報告書は未刊の段階であり、現地を見学した筆者の見解を述べるのは控えることにしたい。

4 古墳時代にみる鉄鋼技術の革新

古墳時代は歴史学の時代区分で、前期、中期、後期に分けられている。西暦年代を当てると、大まかにはそれぞれ3世紀末～4世紀末、5世紀初頭～5世紀末、6世紀代になる。鉄関連の遺構・遺物からみると、とくに中期において鍛冶工房の急増、古墳に埋納される鉄器の数量の増大、武器類が占める割合の増加、新たな鉄素材である鉄鋌の出現などが顕著である。そのため中期に古代の鉄の画期をおく研究者も多い。

4.1 鍛冶工房跡の分布と鉄鋌の出土

古墳時代には鍛冶工房の活動の跡は東日本に到るまで残されているが、実際に検出される工房跡の数は畿内において圧倒的に多い。ある考古学研究者の報文によれば、4世紀～5世紀初頭に鉄滓を出土する工房跡はまだ1例にすぎないが、須恵器出現以降の5世紀前葉～6世紀初頭の間は畿内の中枢部全

域にわたって多数の遺跡が発掘されるので、この時期が鉄器生産の一大画期であるとしている。それ以前の時期には、主として九州や山陽地方の数個所でしか鍛冶工房跡が検出されていない状況に比べると、まさに画期ということができ、同時に鉄器生産の中心が畿内に移ったことを示唆している。

上述の報告では、鍛冶工房跡を含む遺跡からは各種の鉄器の未製品のほかに、鍛冶具、金床、砥石や鉄滓などが出土し、さらに刀剣の製作に関連する刀装具の未製品などが検出された遺跡群も幾つかあって、そのような專業集落（特定工房）は5世紀代に比率としては多くはないものの、次の6世紀代に入っても存続し、非專業集落が終息するのとは異なる傾向を示すことを指摘している。このように畿内では、刀剣製作の工房は最初から專業化された集団として成立し、長期間操業が続いたことが分かる。しかしこれ以外の地域では刀剣製作活動を伴った專業集落の存在はまだ実証されないので、古墳時代に国内で刀剣を製作した地は、現在のところ畿内にあったと考えざるを得ない。

5世紀の中頃になって、銅素材は形状と重量に規格性をもった、いわゆる鉄鋌として流通するようになる。鍛冶工房跡から検出されることもあるが、古墳に大量に埋納されている場合があり、中でも奈良県の大和6号墳からは大小合わせて872枚、140kgの出土を見た。中型・大型の鉄鋌は両端が撥形に開く形式である（図4の付図）。同じ形状のものは朝鮮半島西南部の古墳からも出土しているが、中国大陸ではこれまでのところ検出例がないといわれる。

鉄鋌は板状で重量に規格性があるため、軟銅であれば甲冑の甲片を製作するには便利な素材である。しかし甲片だけに止まるものでないことは、鉄鋌の炭素量を調べてみるとよく分かる。図4a)、b)は大和6号墳の8枚の鉄鋌の重量と炭素分析値で、炭素量の少ないものからアルファベット順に並べてある。利器の刃部に用いられるような炭素量がほぼ0.4%以上の鉄鋌は、8枚の中に2枚入っている。しかし重量との関係は見られない。鉄鋌は明らかに刀剣製作にも

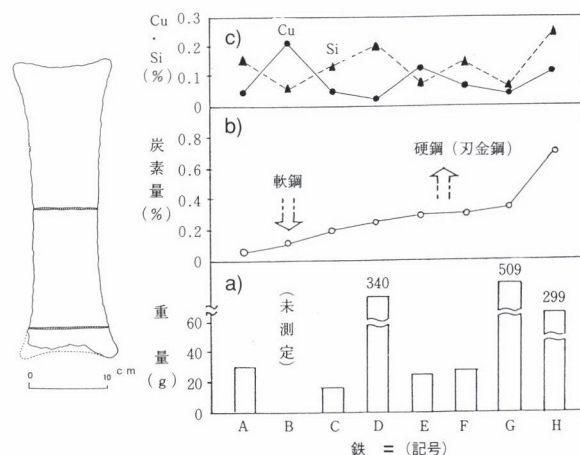


図4 大和6号墳出土鉄鋌の重量と化学組成

利用可能な鋼素材である。中国の文献史料にある「鋌は兵なり」の字句が示すように、やはり武器・武具などの兵器一般の素材と考えてよいであろう。

これらの鉄鋌は一体どこでこのような形に加工されたのであろうか。列島内という考え方も一部にあるが、製鉄が開始される以前であり、また朝鮮半島南部の古墳からも出土しているので、やはりその地で作られたとする見方が一般的である。

しかし鉄鋌の地金自体を、すべて半島の生産とするわけには行かない。大和6号墳出土の鉄鋌8枚のCu分析値を図4c)で検討してみると、0.1%以上の高値のものが3枚あって、高い割合を占めていることに気がつく。またこれまでに報告されている健全なメタル質の古墳出土鉄器については、Cu含有量の多い鋼製鉄器はおおよそ3割の高い頻度で現れている。さらに錆びた鉄器は多数分析されており、その結果もまた同じような傾向を示すことが知られている。

鋼中のCu分は、原料鉱石の磁鉄鉱に随伴する銅鉱物（黄銅鉱、 CuFeS_2 ）に由来する。この種の鉱石は、朝鮮半島では小規模な鉱山が一箇所知られているにすぎず、しかも今世紀に入ってからのものである（日本の岩手県釜石鉱山で磁鉄鉱が採掘されたのは近世末以降）。古代の日本へ長期にわたって多量に供給されたCu含有量の高い鉄の製品・半製品は、朝鮮半島内で産出する鉱石を始発の原料にしたものとはいえない。当時の東アジアの交易と鉄生産の状況からみて、山東半島から揚子江下流域にかけての一带にある、含銅磁鉄鉱を産する鉱山で採掘された鉱石が原料として用いられたと考えざるを得ない（表2参照）。そこで製造された銑鉄や鋼が半島南部に輸送・精錬されて、その地で製造された鋼と一緒に鉄鋌に成形されたのではあるまいか。

4.2 刀剣の製作技法と「百練」の意味

古墳出土の直刀を金属学的に調査し、直刀の製作法の解明を目的とした研究は、大正年間に俵国一氏が着手し、以来、長谷川熊彦氏や末永雅雄氏らによって引き継がれてきた。しかし現在では、文化財保護の立場から出土した直刀を切断することは許されず、断面の鍛造組織をもとにした製作法の検討は不可能な状況にある。

10振りの直刀を調べた俵国一氏は、製刀法を（イ）丸鍛え、（ロ）併せ鍛え（縦に鍛接）、（ハ）併せ鍛え（横に鍛接）の3種に分類した³⁾。筆者なりの見方で、俵国一氏の報告から直刀断面の鍛造組織を引用したのが、図5である。仮に文字A～Fを付し、括弧内には資料番号を記入した。俵氏の分類にもとづけば、Aは丸鍛え、B、C、Eは併せ鍛え（縦に鍛接）、D、Fは併せ鍛え（横に鍛接）になる。製作法の推定は、読者各自で試みていただきたい。

なお、直刀の各部でCu、Pなどの含有量が異なる例が見受けられる。これは上述の鉄鋌の1枚1枚に組成の差があ

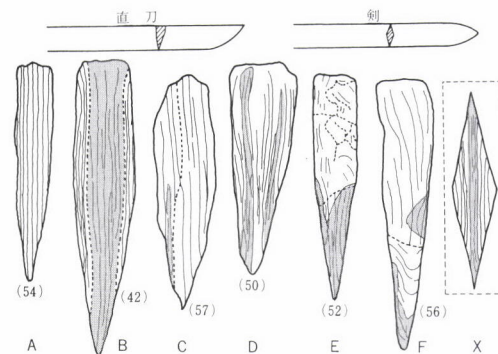


図5 古墳出土刀剣断面の鍛造組織
網掛け部は炭素量が0.5%以上、括弧内は試料番号（俵国一氏による）。

ったことから容易に理解できるであろう。もちろん近くの工房で銑鉄を精錬して作られた銅塊や銅片を使用した場合でも同じはずである。しかも炭素含有量の違う何枚あるいは何個かが組み合わされて直刀に造形されるので、心金と皮金では組成に違いが生ずる。直刀の各部や甲冑の甲片1枚毎の少量成分組成のパラッキは、使用した鋼素材の組成の多様性を反映したものといえる。

つぎに稲荷山鉄劔の鉄錆の解析を通して、「百練」の数の意味を考えてみたい。刀剣製作における「練」は、古くから地金を鍛錬する際の折り返し操作を指し、「練」の数は折り返しの回数を表すものと考えられてきた。実際に他の鉄劔の銘文には「八十練」、「五十練」、「三十練」もある。かつて筆者も「七支刀と百練鉄」の題目で『鉄と鋼』誌に解説記事を書いたことがあるが⁴⁾、そこで述べた見解は今回改めなければならない。

稲荷山鉄劔の表裏に象嵌された115字の銘文の中には「百練」の文字があり、採取した錆片の金属学的調査は同時に百練の技術的根拠を明らかにする機会ともなった（化学組成は表1のNo.10）⁵⁾。錆試料中に見いだされた非晶質珪酸塩系の非金属介在物のうち、断面が不定形で厚みのあるものを示したのが、図2dである。加工変形の度合いが低く、折り返し鍛錬の回数はせいぜい5、6回程度ではないかと思われる。百回の折り返しであれば、介在物はおそらく2、3 μm 以下の厚さになってしまうからである。百練の鋼でないことは明らかで、この時代に「練」の数は技術的な意味を失ってしまい、百練は非常に良質の鋼を意味する用語に変わり、さらには鉄劔の位^{くらい}に対して使われるようになったのかも知れない。

4.3 鋼精錬法と主要な鋼生産地域

最後に介在物の成分組成から、鋼精錬法の特徴を検討してみたい。

図2dに示すような、稲荷山鉄劔錆片中の非晶質珪酸塩系介在物の数個をEPMAで定量分析した結果、Fe、Mn、Ca、Mg、K、Na、Al、Siなどが含まれていた。FeとMnは鋼の精錬過程で鋼側から鉄滓に移った成分と仮定してこれらを

除き、残る6成分が鉄滓本来の成分（以下造滓材成分と呼ぶことにする）とみなして比率を計算し棒グラフで表すと、図6(a)のようになる。粘土の一般的な組成に比べるとCaO、MgOは非常に多く、Al₂O₃ははるかに少ない。銅精錬炉の炉壁は粘土で内張りされるが、造滓材成分は炉壁粘土由来しないことが明瞭である。筆者は、何らかの石灰質材料が、流動性のよい溶融鉄滓を生成させるために添加されたのではないかと考えている。

ここで、いくつかの銅製鉄器中の介在物（非晶質珪酸塩系）の造滓材成分を比較してみると、きわめて重要な事実が浮かび上がってくる。弥生時代の鉄戈も、大和6号墳の鉄鋌も、また安中市二子塚古墳の直刀も、稲荷山鉄剣と同じような成分比なのである（図6(b)～(d)参照）。造滓材成分比がほぼ同じという結果は、銅精錬法の共通性を反映したものと考えるを得ない。当時の東アジアで行われていた有力な銅精錬法はいわゆる炒鋼法であり、この方法の原理は朝鮮半島や日本列島にも伝わっていたのではあるまいか⁹⁾。

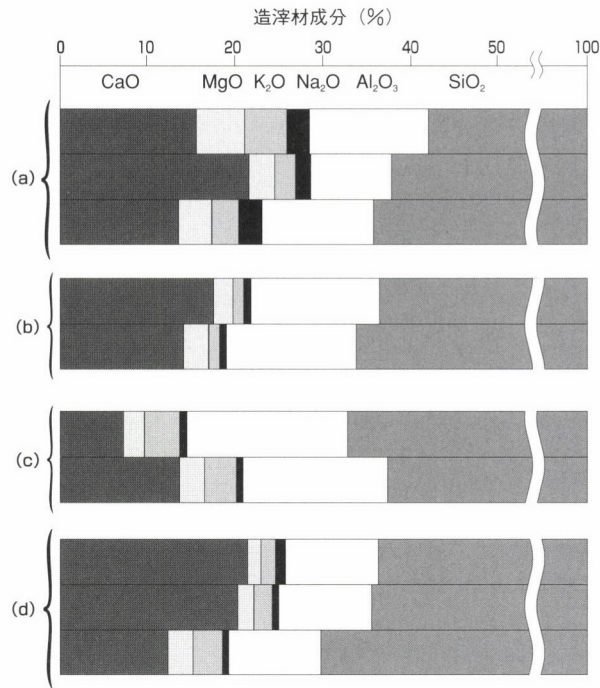


図6 非晶質珪酸塩系非金属介在物中の造滓材成分組成の比較
a) 稲荷山鉄剣、b) 富の原鉄戈、c) 大和6号墳鉄鋌、d) 群馬県安中市二子塚出土直刀。

注4) 上記の論文に筆者等は中国の文献をもとに考察した炒鋼法の操業原理図を報告したが、その後の日本国内の発掘調査結果からみて、この図は修正する必要があると考えている。

前章で述べたように、古代の中国では2世紀頃に鉄鉱石粉を脱炭材として使用する銅精錬が始まった。日本国内でそれが実施された間接的な証拠として、筆者は岡山市堂山2号墳（5世紀後半）出土鉄滓の表面に磁鉄鉱破碎粉が付着し、鉄滓内部ではそれが溶解しかかっているのを観察している（図7参照）。ミクロ組織から判るように、磁鉄鉱は人工的に破碎された粉末粒子である。3個の鉄滓の化学組成が表3で、スラグ成分の含有量がかかり多い。CaOとMgOの対Al₂O₃比を求めると、前者は0.30、0.28、1.22、後者は0.11、0.10、1.98になる。遺構で出土した鉄滓が比較的数量多く分析された岡山県総社市窪木薬師遺跡（6世紀代）のデータを整理し、併せてプロットしたのが図8a)である。古代の鉄滓は溶融酸化鉄と炉壁材が反応して生成したものと考えられているが、その反応に磁鉄鉱が加わったとしても、CaOとMgOの増加は説明できない（住居跡で検出された塊状磁石は脈石の多い廃石ではないかと思われる）。やはり何らかの石灰質もしくはドロマイト質材料が添加されたものとみななければならない。なお、同じ総社市の板井砂奥遺跡（8世紀代）においては、作業場の中で周りよりも一

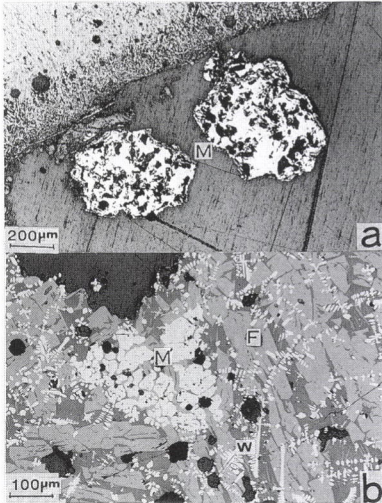


図7 鉄滓の表面に付着した磁鉄鉱粉とスラグ化途中の粒子
堂山2号墳出土鉄滓（表3No.1）。M) 付着磁鉄鉱粉（人工的に破碎された形状を示す）、M') スラグ融液中で細粒化した磁鉄鉱粒子、W) ウスタイト、F) ファヤライト。

表3 古墳の竪穴式石室を充填していた鉄滓の化学組成

NO	化学成分（％）									CaO		MgO	ミクロ組織 （鉱物組成）	造滓材*
	T.Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃				
1	49.71	48.61	27.10	6.54	1.98	0.70	0.20	0.17	0.30		0.11	ウスタイト、ファヤライト、磁鉄鉱粒子 ウスタイト、ファヤライト ウスタイト、ファヤライト、未滓化物	石灰石か	
2	48.72	46.09	27.35	6.46	1.79	0.67	0.23	0.17	0.28		0.10		〃	
3	51.97	50.32	24.01	2.70	3.29	5.35	0.21	0.21	1.22		1.98		ドロマイトか	

注) 古墳は岡山市堂山2号墳、5世紀中葉～後半。
* 銅精錬工程で添加か。

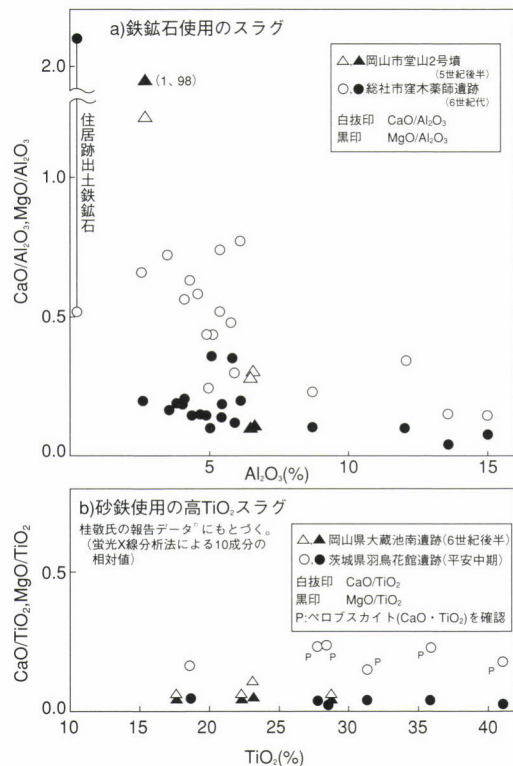


図8 出土鉄滓中の化学成分間の関係

段高く積まれた磁鉄鉱粉の堆積物が検出されており、鉄鉱石を粉状で使用したことは間違いないであろう。

鉄鉱石粉に代わって砂鉄が使用された場合、生成したチタン化合物が鋼中に介在物として残る。ただしこれはあくまでも鋼精錬の段階でのことで、製錬工程で銑鉄が製造されるときには、チタン分は溶融状態の銑鉄から完全に分離して鉄滓の方に移り、さらに銑鉄が精錬されたあとでは鋼中にその痕跡を留めることができない。

従来の金属学的な調査結果から砂鉄使用と確実にいえる最古級の鉄刀は、6世紀後半の直刀（長野県穂高町上原古墳）と7世紀初頭の短刀（神奈川県座間市石名坂横穴墓）の2振りである。鉄刀以外の鋼製鉄器では、後期の古墳から出土した鉄鎌の1例だけである。チタン化合物はいずれもウルボスピネル（理論化学組成は $2\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ ）と同定された。

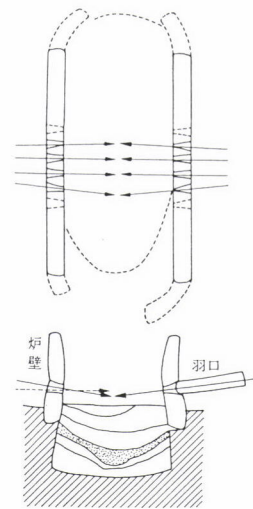
砂鉄使用の鋼製鉄器を検出する意味は何処にあるのだろうか。筆者は“検出の頻度”にあって、それは国産の鋼の生産の増大と流通の程度を知ることにつながるものと考えている。この時代に鉄鉱石が確実に利用されたのは、出土遺物の金属学的調査結果から近江と山陽の2地方だけである。砂鉄使用の鉄器の増加は、銑鉄を国内で精錬して鋼を製造する地域が拡大したことを間接的に示すはずである。古墳時代の鋼製鉄器の金属学的な調査はすでに数百点になると思われるが、ミクロ組織まで調べられているのはおそらく百点を越しているであろう。その中でチタン化合物が後期の資料に初めて検出され、しかも3例に過ぎないという事実は、砂鉄を添加・製造した国産の鋼の流通の割合がまだ低い水準にあったことを表して

いる。この時期に国内の大規模な鋼生産の基地は、まだ地域的に限定されていたのではあるまいか。

5 読者への設問—復元された古代の製鉄炉は技術的に妥当と考えるか

列島内における鉄生産の開始時期については、今日なお活発な議論がなされている。①農具の鉄器化が完了する弥生後期、②畿内において鍛冶工房の急激な増加がみられる5世紀前半、③古墳に大量の鉄器が埋納される5世紀中頃から後半にかけて開始されたとする説などが考古学関係者から出されている。これらは鉄器の生産と使用の増大にもとづいているが、やはり一種の状況証拠といえる。国内の小規模な鉱床で採掘した磁鉄鉱が製錬されたとしても到底需要を満たすことはできないし、また出土鉄器の金属学的解析結果も輸入鉄素材の利用が続いていることを表している（表1のNo.11～14参照）。

これまでのところ、製鉄炉と考古学的に判定された最も古い遺構は6世紀後半で、西日本の数カ所で発見されている。岡山県久米町大蔵池南遺跡を始めとして、同県総社市千引かなくろ谷、広島県世羅町かなくろ谷、滋賀県木之本町古橋遺跡などである。

図9 箱型製鉄炉の復原図
福岡県志摩町八熊遺跡、8世紀代。

7世紀に入ると製鉄炉跡とみられる遺構が増加し、次の奈良時代には東北地方でも検出されている。律令体制下で、調・庸としての鉄生産が拡大した結果と考えられている。

この時期の製鉄炉には「箱形炉」ならびに「竪形炉」と呼ばれる2種類がある。前者の復原図を図9に示す。8世紀のものであるが、炉床は長方形をなし、その四辺に粘土と砂を混ぜて固めた炉壁が築かれ、長辺の炉壁下部には対に装着された合計6本の羽口がある。残存する炉壁片を繋ぎ合わせて推定された炉高は約50cmである（他の遺跡では約65cmという報告例もある）。炉床の下に焼土と木炭粉を

表 4 鉄塊系遺物の化学組成

No	遺 跡	年 代	化 学 成 分 (%)									ミクロ組織
			T.Fe	C	Cu	P	V	Ni	Co	Ti	Si	
1	茨城県成東町真行寺廃寺跡*	8C末～9C初	(メタル)	4.23	0.048	0.28	0.042	0.037	0.040	Nil	Nil	レーデブライト
2	静岡県天王中野遺跡	8C代	58.41	——	0.082	0.035	0.003	0.012	0.010	0.001	0.009	〃

*大沢正己氏による。

表 5 8世紀代の鉄刀中の介在物に見出されたチタン化合物のEPMA定量分析結果

No	種 別	出 土 地	化 学 成 分 (%)										チタン化合物の 種類
			FeO	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	SiO ₂	
1	刀	宮城県名取市高館熊野堂横穴墓	57.5	0.6	0.0	3.1	0.0	0.0	2.5	32.0	0.0	0.0	ウルボスピネル 新種の化合物か*
2	薙手刀	岩手県一関市金ヶ崎西根古墳	10.79	0.72	0.59	7.79	0.05	0.03	1.82	79.16	0.02	1.06	

*xMgO・y (Ti,Al)₂O₃とも表わせるようなチタン化合物で、最近では鉄器・鉄滓中に見いだされた例がかなり多く報告されるようになった。

敷き詰めて地下からの湿気を防ぐようにしているが、後世に見るような防湿構造はまだ造られていない。原料の砂鉄と木炭は、炉の上方から層状に交互に装入され、同時に羽口から空気が吹き込まれて木炭が燃焼し、砂鉄の還元が急速に進むような高温帯が得られると推測している。ただし上述の炉高で十分な長さの還元帯が得られるのかどうか、当初から疑問が出されている。なお、この遺跡内では炉跡の近くに砂鉄貯蔵穴が見つかった。

このような炉を利用して製造された鉄が、^{すく}銑を主体とするものであったのか、それとも鋼あるいは^{けら}鋸だったのか、議論の分かれるところである。

そこで、本章の表記の問題に接近するためのデータを読者に提供しておきたい。表4は鍛冶工房跡から出土した鉄塊系遺物と呼ばれるもの2例の化学分析値で、No.1は完全な銑鉄塊、No.2は表面にスラグが生成した“反応途中の鉄塊”である。また、前述の大蔵池南遺跡（推定炉形は箱形炉）から出土した高チタン含有量の鉄滓についての報告値⁷⁾をもとに、CaOとMgOの対TiO₂比を産出して図8b)にプロットした。ただし分析試料数の少なさを補うため、この図には平安期の同様組成の鉄滓の分析例を併記してある。さらに表5には、8世紀代の鉄刀二振りの中で見いだされたチタン化合物の、EPMA定量分析値を示した。読者各位には、鉄塊→鉄滓→非金属介在物を結ぶ合理的な関係を見つけた上で設問を検討していただきたい。

6 おわりに

鉄関連の出土遺物は、慎重に選び出された試料について金属学的に適正な解析が行われるようになってから、隠された鉄の歴史を語り始めた。今日こうした研究は、文化財科学の分野で取り組まれている。古代日本の鉄の歴史の解明は、文献史学においては国家形成の問題だけでなく、東北アジアの交易と流通という経済史の重要な課題をも構成

している。読者の皆さんには、引き続き鉄の歴史に関心を持っていただくことを期待する。

参考文献

遺跡発掘調査報告書は発行部数も少なく、一般の人達が入手するのは難しい。文中に取り上げた遺跡に関する報告書をどうしても利用したいと思う方には、該当する県の教育委員会もしくは埋蔵文化財調査センターに問い合わせていただくことになる。

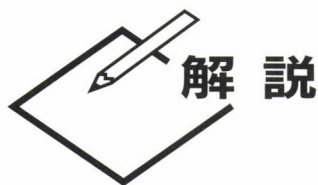
ここでは大学の考古学研究室ならば閲覧させて貰える学術誌、ならびに一般の書店で購入が可能な著書から引用した文献を挙げることにしたい。

- 1) 例えば海外製鉄原料委員会『アジア東部の鉄鉱資源』1969年
- 2) 花田勝宏：考古学研究「倭政権と鍛冶工房―畿内の鍛冶専門集落を中心に」、第36巻, 第3号, 1989.12, p.67
- 3) 俵国一：日本刀の科学的研究（復刻版）, (1982), 日立印刷出版センター
- 4) 佐々木稔：鉄と鋼「七支刀と百練鉄」68 (1982), p.178
- 5) 日吉製鉄史同好会：鉄の文化史「稲荷山鉄剣の六片の錆」, 新日本製鉄（株）広報室編, 東洋経済新報社, 1984, p.148
- 6) 佐々木稔, 村田朋美, 伊藤叡：日本製鉄史論集「古代における炒鋼法とその製品」, たたら研究会編, p.615, 1983
- 7) 桂敬：古代日本の鉄と社会「砂鉄製鉄の原理について」, 東京工業大学製鉄史研究会, 1982, 平凡社

全般に係わる上記以外の著書としては、以下のものを挙げておく。

- i) たたら研究会編『日本古代の鉄生産』1991, 六興出版
- ii) 潮見浩『東アジアの初期鉄器文化』1982, 吉川弘文館
- iii) 川越哲志『弥生時代の鉄器文化』1993, 雄山閣出版
- vi) 石井昌国・佐々木稔『古代刀と鉄の科学』1995, 雄山閣出版

(1996年1月30日受付)



鋼はどのように造られるか

—製鋼プロセスの紹介—

池田隆果

Takami Ikeda

住友金属工業(株) 総合技術研究所 上席研究主幹

How Steel Is Produced ? —An Outline of the Steelmaking Processes—

1 はじめに

1856年Bessemerは溶けた銑鉄を入れた容器(転炉)の底から空気を吹き込んで脱炭し、溶けた鋼を作ることに成功した。鋼の大量生産への道を開いた近代溶鋼法の誕生の瞬間である。これに続いて、スクラップなど冷たい鋼を溶かせる平炉、高りんの鉄鉱石からつくった銑鉄を脱りんできする塩基性のThomas転炉などが登場し、製鋼の基本問題が順次解決されて溶鋼法は確立していった¹⁾。

製鋼技術の次の革新は1950年から1970年頃にかけての純酸素上吹き転炉(LD転炉)、溶鋼の真空処理、電気炉のUHP(超高電力)操業、ステンレス鋼の新製鋼法、連続製造法、等の目白押しの登場で、現在の製鋼プロセスの根幹が出来上がった。

その後、純酸素底吹き転炉(OBM,Q-BOP)の出現を契機としたLD転炉の上底吹き化や、製品の高機能化に対応した鋼の高純度化・均質化のための二次精錬、溶銑予備処理、連続製造等での多くの技術開発がなされてきた。

本稿では主に我が国では現在どのような製鋼プロセスが行われているか、不純元素をどのように除去しているか、均質な铸塊を得るのにどうしているか、今後製鋼プロセスはどう変化しようとしているか、等に重点を置いて解説したい。

2 現在行われている製鋼プロセス

低合金鋼を含む炭素鋼とステンレス鋼の製鋼プロセスについて述べる。

2.1 炭素鋼の製鋼プロセス

現在我が国で行われている典型的なプロセスを図1に示す。高炉で鉄鉱石をコークスで還元して得た溶銑(おおよそC 4.5、Si 0.2-0.5、Mn 0.2-0.5、P 0.1、S 0.03各mass%)を主原料とする転炉製鋼法と、鋼スクラップを原料とする電炉製鋼法の2つに大別される。粗鋼年産量(1993年)は各々6850万tと3110万tで、電炉鋼の比率が増加しつつある。

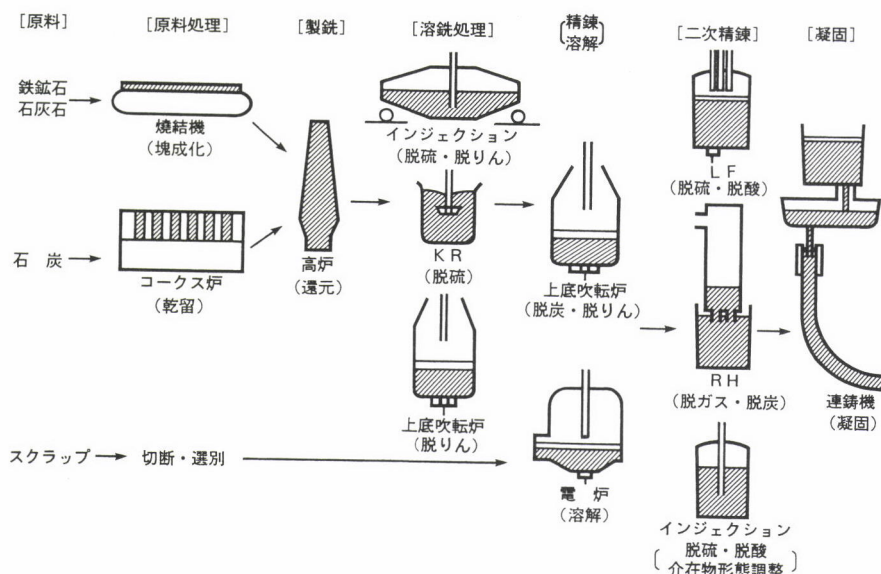


図1 炭素鋼の製鋼プロセス

2.1.1 転炉製鋼法

超音速酸素ジェットを上吹きして精錬するLD転炉の底から攪拌用のガスを吹き込む上底吹き転炉が主で、一部底吹き転炉（Q-BOP）が用いられている。

LD転炉は1960年代にそれまでの主役であった平炉の地位を一気に奪ったが、これは吹錬時間20分、製鋼時間1時間と平炉の数倍以上の高生産性を持ち、スクラップに頼らないプロセスであり（ある面では欠点でもあるが）、品質面でも窒素含有量が低い等大きな利点を持っていたためである。当初は転炉で脱炭と脱りん、取鍋で脱酸、成分調整、温度調整を行って鑄込むのを基本にしていたが、次第に変化して、図1のように溶銑段階で脱硫と脱りん、転炉で脱炭、取鍋で脱水素、極低炭素までの脱炭、脱硫、脱酸および非金属介在物の形態調整などの二次精錬、と精錬機能を分担するようになってきている。

溶銑処理のうち脱硫は搬送容器のトビードカーや注銑鍋内で脱硫剤のインジェクション等で行う。脱りんは予め高炉鑄床等で脱珪した後、同様の容器内で石灰－酸化鉄系フラックスで処理するが、転炉を使って予備脱りんするものも増えている。

脱りんした溶銑は上底吹き転炉で少量の石灰を用いて0.03mass%までの脱炭と2次的な脱りんを行う。上底吹きは脱炭中に鉄が過剰に酸化するのを防止するため、攪拌が強く鉄の酸化が少ない底吹き転炉の利点を取り入れたものである。

二次精錬炉には攪拌、加熱、フラックス精錬、真空処理などの機能を複数具備した多くのプロセスが用いられている。幾つかの例を上げると、アーク加熱を持つLF炉は脱硫、脱酸に用いられる。気泡ポンプで溶鋼を真空室に吸い上げて処理するRHは、脱水素、極低炭素化、脱酸に用いられる。また大気圧下でフラックスやCaSiをインジェクションするプロセスは脱硫、脱酸や非金属介在物の形態調整に用いられる。

2.1.2 電炉製鋼法

電炉では溶解を主とし、二次精錬炉で転炉の場合と同様に仕上げ精錬を行う。

電炉は以前は特殊鋼の製造にのみ用いられたが、今ではスクラップから普通鋼を量産する炉としてのウェイトが大きい。これは転炉のスクラップ消化率が約20%と低いためでもあるが、電炉自身の高エネルギー化が達成できたことに大きく負っている。排ガスの熱を利用したスクラップ予熱、溶損防止に水冷パネルの炉壁を用いたUHP操業、大量の酸素吹き込みによる溶解の促進、炉底出鋼法、さらには直流電炉の導入、等により製鋼時間は約1時間に短縮され、電力原単位も300kWh/t（1.08GJ/t）近くにまで下がっている。

スクラップが主原料だけにCu、Sn等精錬で除去できないトランプエレメントの混入防止に対してはスクラップの選択や銑鉄、直接還元鉄のようなバージンな原料の配合による希釈が必要となる。

2.2 ステンレス鋼の製鋼プロセス

我が国のステンレス鋼の年産量は世界第一位の330万t（1993年）に達し、今やポピュラーな材料となっているが、これは1970～80年代にかけてそれまでの電炉単独の大気圧下の精錬からVOD法（真空酸素脱炭法）、AOD法（アルゴン酸素脱炭法）という低CO分圧下で精錬を行う革新的な新製鋼プロセスが開発されたことに負う所が大きい。

ステンレス鋼と炭素鋼との違いは、鉄よりも酸化しやすいクロムが通常18%含まれていることである。このクロムの酸化を防ぎながら0.06または0.02mass%以下まで脱炭するのに、VODでは真空中で攪拌しながら酸素上吹きを行う。AODでは大気圧下で酸素－アルゴン混合ガスの底吹きを行うが、Cの低下につれて酸素/アルゴン比を下げて行く。電炉単独の時代には多量のCrを酸化しながら脱炭した後にSiによるCrの還元と高価な低炭素フェロクロムの形でCr分の追加をしなければならなかったが、新製鋼法は高炭素フェロクロムのみで造れるようになった。

実用されているプロセスは図2のようにバラエティに富んでいる。ニッケル系ステンレス鋼の場合はニッケルを含んだスクラップを主原料として電炉で粗溶鋼（C 1mass%以下）をつくり、AODかVODで脱炭をするところが多く、クロム系ステンレス鋼の場合は高炉からの脱りん溶銑とフェロクロムを高炭時に酸素上吹きを併用出来るAOD炉1炉で脱炭するか、又は上底吹き転炉でCrの酸化が進まないレベルのC（0.3mass%以上）まで粗脱炭した後、VODで仕上げ脱炭しているところが多い。また、クロム鉱石から直接クロムを溶融還元するところも出てきている²⁾。

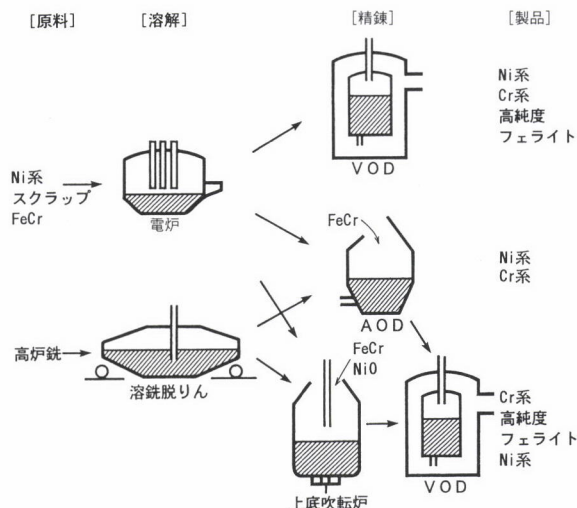


図2 ステンレス鋼の製鋼プロセス

2.3 連続鋳造法

現在凝固プロセスの主流を占めている連続鋳造法について述べる。

凝固プロセスは1960年代から1970年代にかけて大型銅塊一分塊方式から連続鋳造方式へと次第に置き換わり、今や極厚品と極太品を除いてほとんど全て連続鋳造法で固められるようになり、連鋳比率は95.7%(1993年)に達する。これは連続鋳造法が歩留まり向上、鋳片内成分の均一化、分塊工程省略による省エネルギー等多くの利点を持っているためである。

連鋳鋳片の断面は製品に応じて板用は200mm厚前後のスラブ、条銅用は2ヒート圧延には300~400mm角のブルーム、1ヒート圧延には100~200mm角のビレットが一般に用いられている。シームレス管用には丸ビレット鋳片が直接用いられつつある。

連続鋳造機の形式には垂直、垂直一曲げ、湾曲などの型があるが、最近では特に気泡や介在物防止の点で垂直一曲げ型が多くなっている。

連鋳プロセスの構成要素を図3に示す。溶銅は取鍋からタンディッシュ、浸漬ノズルを経て水冷銅鋳型へと鋳込まれる。タンディッシュは低ヘッド給湯、多ストランドへの溶銅の分配および多ヒートの連鋳のためのもので、電磁誘導加熱やプラズマ加熱によって鋳込み温度を正確に制御するものが増えている³⁾。取鍋とタンディッシュの間は、アルゴンシール等で空気による溶銅の再酸化、窒素および水素吸収を防止する。

浸漬ノズルは一般にアルミナ-グラファイト質で、スラブ用鋳型では横方向2方向へ、ブルームも通常2方向へ、細

いビレットでは下方のみへ給湯される。鋳型内湯面にはCaO-SiO₂-C系の粉末(パウダー)を乗せる。これは溶銅表面で溶融して溶銅の酸化を防止し、鋳型-鋳片間に流れ込んで潤滑剤として働く。

水冷銅鋳型は数mmのストロークで80~400回/minの上下振動(オシレーション)をさせる。この水冷銅鋳型、潤滑剤およびオシレーションは銅の連続鋳造を可能にした3要素である。

銅片は一般に0.5~3m/minの範囲で薄い(細い)ものほど速く連続的に引き抜かれる。鋳型をでたあと凝固が完了するまで溶銅静圧によるシェルの変形(バルジング)を防ぐためにローラーでシェルを保持しながら水のスプレー又はミストで鋳片を冷却する(二次冷却)。凝固の進行速度はおおよそ平方根則($25 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1/2}$)に従うので200mm厚鋳片では凝固に10数minかかる。

湯面レベルの変動は鋳片表面性状に悪影響を及ぼすため渦流センサーなどによって湯面を制御している。また、連鋳機に電磁石を取り付けて等軸晶生成のための溶銅攪拌や介在物の侵入防止のための注入流の制動を行っているところが多い⁴⁾。

凝固完了した鋳片は矯正・切断し、圧延工程へ送られるが、鋳片の保有している熱を有効活用するため、熱片を加熱炉へ直接装入(ダイレクト・チャージ)したり、熱片を直接圧延(ダイレクト・ロール)するようになってきている⁵⁾。後者の場合1GJ/tの省エネルギーになる。

3 不純物はどのように除去するか

高純度銅や清浄銅の製造に必要なC、P、S、O、Nの除去方法について、必要性、原理、歴史的背景、プロセスの選択などの観点から要点を述べる。

3.1 炭素の除去

炭素は銅の組織、強度を決める基本成分で、それぞれの銅種で目標があるが、深絞り用、電磁用、ほうろう用、高純度フェライト系ステンレス銅では極低炭素が要求される。

溶鉄中のCは酸素で酸化してCOとして除去するが、如何に鉄を酸化させないで脱炭するかが課題である。溶鉄中ではCとOとの間には平衡状態で一定の溶解度積があり、CO分圧に比例して大きくなる。このためCが下がるとOが増加してくる。大気圧下ではCが0.013mass%でOは0.2mass%のFeO飽和点に達し、これ以上は脱炭できない。CO分圧を1/10以下に下げるとFeO飽和のCが0.001mass%以下まで下がるため脱炭が進む⁶⁾。

転炉では溶銅の上にスラグが存在し、Cが低下して溶銅のOが増加するのに対応してスラグ中のFeOも増加するた

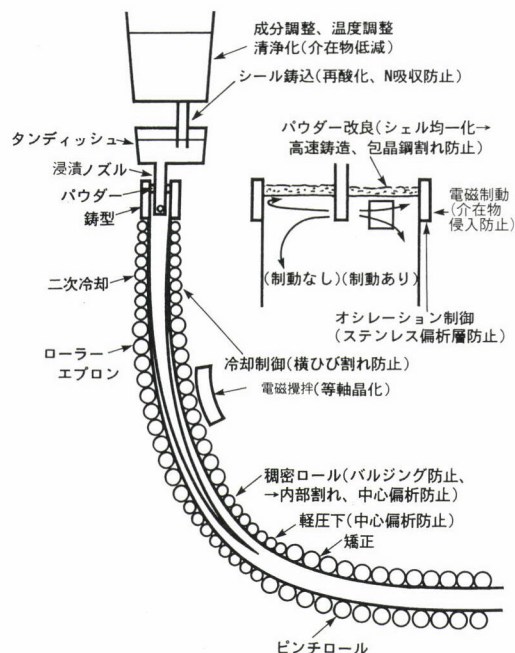


図3 連続鋳造機と鋳片欠陥防止対策

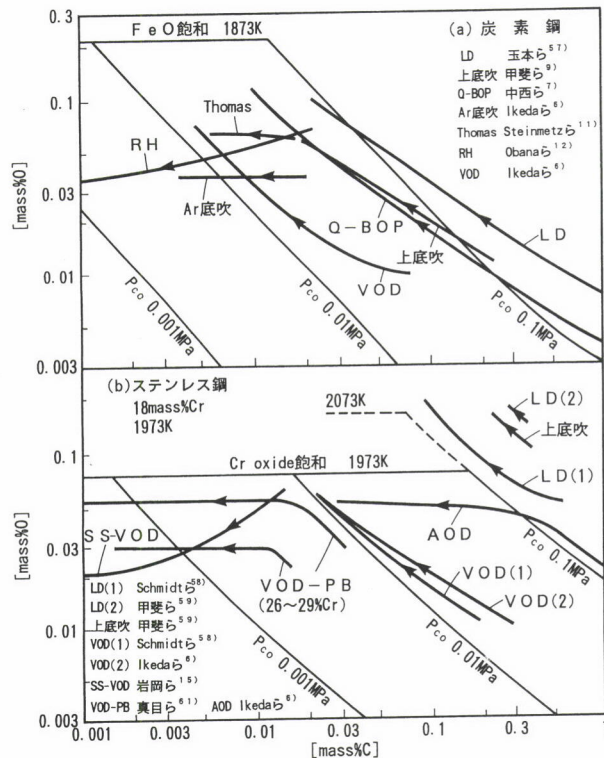


図4 脱炭挙動のプロセス別比較

め脱炭が進みにくくなる⁶⁾。上吹き転炉は浴の攪拌が弱い
ために溶鋼以上にスラグが酸化しやすく、この傾向が顕著
である。攪拌の強い底吹き転炉は羽口保護用の炭化水素ガ
スによるCO希釈効果⁷⁾、スラグによる脱炭効果⁸⁾、などで溶
鋼の酸素が大気圧下での平衡値よりも低くなり、脱炭は進
み易い。上底吹き転炉ではこの底吹き転炉に近い効果が得
られる⁹⁾。しかし実操業では鉄の酸化ロスを考慮して吹き
止めCは上底吹き転炉で0.03mass%程度にとどめている。

転炉のみでこれ以下まで脱炭するには、CO分圧を下げ
た精錬が必要で、底吹き転炉で酸素吹き止め後にアルゴン
のみを吹き込めばCを0.01ないし0.005mass%以下まで下げ
ることは可能である^{7)、10)}。なお、窒素でCOが1/3以下に希
釈される空気底吹きのThomas転炉では、0.006~0.010mass
%まで脱炭できる¹¹⁾。

薄板連続焼鈍材として大量に使われている30mass ppm
以下の極低炭素鋼は取鍋真空処理でCO分圧を下げて造ら
れる。転炉で0.03mass%まで脱炭した後、RHで真空処理
する¹²⁾。一般には酸素吹き込みは行わずに溶鋼自身に溶解
した酸素を用いて脱炭しているが、Cが高目のところから
酸素を吹き付けて脱炭することも可能である¹³⁾。脱炭速度
の向上には浸漬管径拡大による循環速度の増加や真空槽内
へのアルゴン吹き込み等が行われている¹⁴⁾。

ステンレス鋼では、18mass%のCrを含む場合、大気圧下
で酸素で脱炭するとCが0.2mass%に達するとCr自身が酸
化し出すが、VOD、AODで低CO分圧精錬を行うと、Crの
酸化が始まるCが0.02mass%以下まで下がる⁶⁾。両プロセス

ともに酸素の吹き込まれた場所でCrが一度酸化しても、こ
の酸化クロムが脱炭のための酸素源として使われうる範囲
が低炭素領域まで拡大するため、これはバルクの溶鋼の
Oレベルが低下することに依っている⁶⁾。

また、数10mass ppmのCとNを要求される高純度フェライ
ト鋼の製造には、VODで強攪拌を行ったり(SS-VOD法)¹⁵⁾、
酸化鉄粉末を吹き付ける(VOD-PB法)¹⁶⁾ ことによって、
脱炭・脱窒を促進している。

以上の炭素鋼とステンレス鋼の脱炭挙動を比較して図4
に示す。

3.2 りんの除去

りんは凝固時の偏析を助長し、また製品で靱性劣化の原
因となるため、低温用鋼、耐水素誘起割れ鋼等多くの用途
で低減が求められる。

主に鉄鉱石と一部石炭に含まれるりんは高炉で還元され
て溶銑にそのままたらされ、通常0.07~0.12mass%であ
る。製鋼ではこのりんを酸化させてCaOを含む塩基性のス
ラグに分配させて除去する。

塊石灰を使用するThomas転炉(空気底吹き)では脱り
んはCが0.1mass%以下まで脱炭してから進行する¹⁷⁾。これ
は底吹きで攪拌が強いためにCが高い間はスラグのFeOが
高くなれず、酸化力が弱いので、窒素によるCO希釈効
果のためばかりではない。純酸素底吹き転炉でも石灰を塊
状で添加するプロセス(LWS)では脱りんは同様にCが
0.35%まで下がってから進行する¹⁸⁾。一方、石灰を粉末に
して酸素と一緒に底吹きするプロセス(OBM、Q-BOP)で
はCが高い時期から脱りんが進行する^{10)、19)}。これは石灰が
吹き込まれたところでFeOを含んだスラグが生成し、脱り
んが進むためである²⁰⁾。

LD転炉は攪拌が弱く、鉄の酸化によるFeOの生成が多
い欠点があるが、脱りんにはこれが幸いし、塊石灰を使っ
ているにもかかわらず吹錬の初めから顕著な脱りんが進
む。このため目標C量で吹き止めるキャッチ・カーボン法
が可能である。底吹き転炉の出現が契機になって過多の鉄
酸化を防止するため攪拌用ガスの底吹きが取り入れられた
が、FeOが低下しても脱りん反応が平衡に近づくため、か
えって脱りんには有利に働く²¹⁾。

ただ、転炉による一回の脱りんではスラゲーメタル間の
りんの分配比の制約から0.010或いは0.005mass%以下の低り
ん鋼を得るのが難しく、前述のように溶銑脱りん処理が行
われるようになった。溶銑段階の処理が低温でなされる点
は脱りん反応にとって有利であるが、Cが高いだけに脱り
んフラックスの酸化力を高くしておくことが必要である²²⁾。
この処理でPを0.03mass%まで下げておくで脱炭炉での脱
りんで低りん鋼が容易に得られる。また、脱炭炉の生成ス

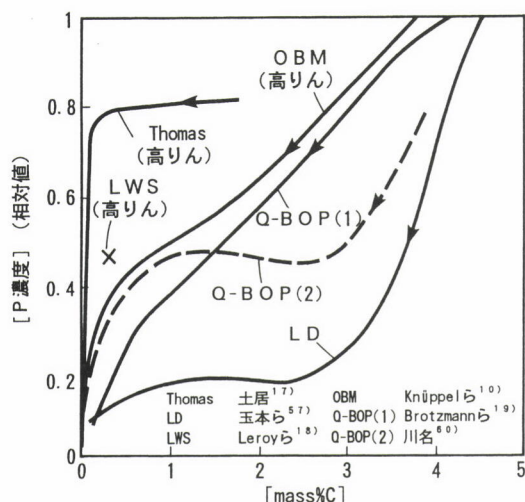


図5 転炉の脱りん挙動のプロセス別比較

ラグを脱りん用フラックスに再利用すれば発生スラグ量を大幅に低減できるという利点がある²³⁾。

以上のプロセス別の脱りん挙動を比較して図5に示す。

3.3 硫黄の除去

硫黄は圧延によって伸びたMnSとなり、圧延横、厚み方向の延性・靱性劣化や水素誘起割れの原因になるため、熱延コイル、厚板、ラインパイプを始め多くの用途で低減が必要である。

石炭中のSはコークス化の段階で30%、高炉でスラグとして90%除去されるが、溶銑中に0.03mass%前後残ってくる。このSを脱硫反応の進みやすい還元性雰囲気での溶銑段階と鋼の脱酸が終わった取鍋内で塩基性フラックス等で固定して除去する。

溶銑では脱硫剤として以前はソーダ灰、炭化カルシウムが使われたが、最近は生石灰を主にした経済的な脱硫剤が使われている。極低硫鋼の場合は0.003mass%程度までさげる。

転炉は酸化性雰囲気のため脱硫率は50%と低く、特に低硫の場合は副原料からピックアップするので、最終の脱硫は取鍋で行う。CaO-CaF₂系、CaO-Al₂O₃系など脱硫能力の大きなフラックスを取鍋で加熱・攪拌したりインジェクションすることにより、数mass ppmの超低硫鋼の製造も可能である²⁴⁾。また、耐水素誘起割れ鋼では、有害なMnSが

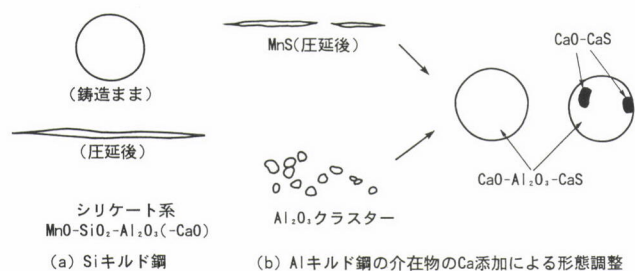


図6 非金属介在物と形態調整 (模式図)

凝固時に生成するのを防ぐため、脱硫後にCaSiをインジェクションやワイヤーで添加して圧延後にも伸びないCaO-Al₂O₃-CaS系の球状介在物に調整する (図6)²⁵⁾。

3.4 酸素の除去

溶鋼の酸素は凝固時のCO気泡発生の原因になり、また凝固鋼で酸化物系介在物となって製造工程で疵になったり、製品の性質を損なう。例えば軸受鋼では疲労強度から数mass ppmの超低酸素鋼が要求される。またコードワイヤー材では伸線時に断線しないよう延伸介在物が望まれる。

脱炭が終わった溶鋼は数100mass ppmの酸素を含んでいるので、酸素との親和力の強い元素を添加して脱酸を行う。Mn、Si、Alが一般に使われるが、酸素と脱酸元素の濃度との間には一定の溶解度積があり、この元素の順に酸素が低くなる。通常合金成分として脱酸力の弱いMnを含んだ鋼にSi脱酸、Si-Al脱酸、Al脱酸がなされている。Alを使う場合には0.03mass%で溶解酸素は2mass ppmと充分低いが、脱酸生成物のAl₂O₃をどう分離するかが問題となる。10 μm以下の径では静止浴での浮上速度は0.1mm/sよりも小さく分離は期待できないので、介在物の凝集肥大や塩基性スラグへの吸着が期待出来る攪拌処理を行っている²⁶⁾。また、真空処理で強制的に発生させた窒素気泡に介在物を付着させて分離する方法等が開発されている²⁷⁾。また、Si脱酸の場合は0.3mass%で100mass ppmと残留酸素が多いので、脱酸生成物のSiO₂の働き (活量) を下げてSiの脱酸力を強くできる塩基性のフラックスで溶鋼を処理して低酸素鋼を得ている²⁸⁾。

清浄鋼製造で注意しなければならないのはスラグ、空気、耐火物による溶鋼の再酸化の防止である。電炉の炉底出鋼によってFeOの高い炉内スラグの取鍋への流出を防ぐことによって軸受鋼で5mass ppmの超低酸素鋼が得られている²⁹⁾。

3.5 窒素の除去

窒素は一般的に鋼を硬くするが、特に連続焼鈍用薄板材の深絞り性向上やフェライト系ステンレス鋼の靱性、耐食性向上にはその低減が必要である。

窒素は溶鋼中へN₂分圧の平方根に比例して溶解する。その低減のためには真空あるいは他のガスで分圧を下げてやる必要があるが、脱窒反応は溶解NがN₂になる化学反応律速で、一般に進行が遅い。

上底吹きを含めて純酸素転炉は莫大な量のCOガス発生によって吹き止め時には窒素は10~20mass ppmと低いレベルまで下がる³⁰⁾。しかし出鋼時に脱酸を行うと20~30mass ppmのピックアップが起こる。これを防止するには未脱酸で出鋼する³⁰⁾。これはOが溶鋼の界面活性元素でNの吸収を阻害することを利用したものである。窒素は低窒素域ではRH真

空処理では除去しにくく、逆に浸漬管部からの空気の侵入防止に努めている³¹⁾。連続鋳造時の窒素ピックアップ防止のためにシール鋳込みは不可欠である。これらの総合対策によって転炉鋼のNは20mass ppmくらいまで低減できる。

電炉鋼の窒素は炉内への侵入空気の窒素がアークによって溶鋼へ吸収されやすいため通常50mass ppm以上と高めである。

ステンレス鋼ではAOD精錬では還元期および出鋼時に数10mass ppmのNの吸収があって不利で、低窒素を要求されるものは一般にVODで精錬されている³²⁾。脱炭量にもよるが真空下でのCOガス発生に伴って50mass ppm以下までNが下がる。高純度フェライト鋼ではさらに前述のような手段でCと同時にNを下げている。

4 均質な鋳片はどのようにつくるか

連鋳鋳片の品質の理想は欠陥が無く均質なことである。ここでは図7に示すような鋳片の表面疵、内部割れ、中心偏析及び介在物をどう防止しているか述べる。なお、図3に対策を併記している。

4.1 表面疵

連鋳の高速化は後述する薄スラブ連鋳法だけでなく連鋳の能率向上に必要であるが、鋳造速度の増加につれてパウダー消費量が減少し、低炭素鋼でも縦割れが発生する。これを防止するには適正な凝固点と粘度を持ったパウダー組成の選択が必要で、実機で非サイン振動と Li_2O 入りパウダーの組み合わせで2.5m/min³³⁾、また中厚スラブ試験連鋳機で5m/min³⁴⁾が達成されている。

Cが0.1mass%強の亜包晶鋼は凝固時の収縮が大きく、水冷銅鋳型で急冷すると凝固シェルの発達が不均一になって表面凹凸や縦割れが発生し易い。対策として、緩冷却効果のある結晶化温度の高い組成のパウダーによってシェル成長の均一化を計っている。丸ビレットではシェルの均一成長によってビレットの真円度が著しく向上する³⁵⁾。

極低炭素鋼では表皮部にアルゴンの気泡や介在物が捕まって疵になりやすい。オシレーションで出来るマーク部に

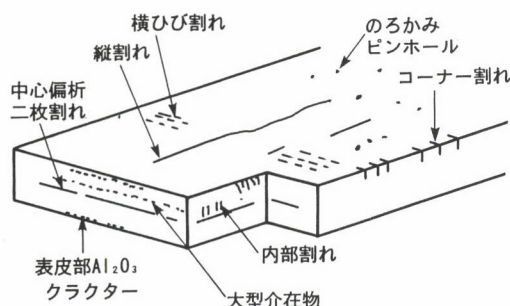


図7 連続鋳造鋳片に発生しやすい欠陥

爪状組織が出来やすく捕捉される、凝固が不均一、などの原因が指摘されている³⁶⁾。浸漬ノズルの詰まり防止に使うアルゴン量の制限や気泡・介在物が捕捉され易い湾曲型から垂直一曲げ型への転換が計られている。

包晶鋼では表皮部に横ひび割れが発生し易い。この種の鋼は冷却中にオーステナイト粒が成長し易く、低歪み速度の鋳片矯正時に粒界のフェライトネット中に析出した AlN や NbC が起点となって割れるためである³⁷⁾。矯正時まで A_3 変態の始まらない高温を維持するか、 $(\gamma + \alpha)$ 二相共存域近傍の脆化域以下の温度まで冷却して矯正するか、いずれかの鋳片冷却パターンを取るによって、この疵を防止している³⁸⁾。鋼の用途によっては微量のTi添加によるNの固定も有効である。

オーステナイト系ステンレス鋼ではオシレーションマークの溝の底に数100 μm の濃化偏析層が出来て冷延製品で疵になる。濃化液の滲みだしと濃化液のオーバーフローの二説がある。小ストローク高サイクルなどオシレーション条件の選定によって濃化層を浅くして対処している³⁹⁾。

4.2 内部割れ

凝固進行中の鋳片はロール間のバルジングや曲げ・矯正で変形を受けて固液界面で割れが発生し、割れの中に凝固偏析でできたS、P、Cなどの濃化した液が侵入して欠陥となる。凝固中の鋳片の割れは、固相の割合が0.8から0.99の間の状態にある時に受ける累積引っ張り歪み量が、C、Sなど鋼の成分にもよるが、約1.0~2.0%に達すると割れることが判明し⁴⁰⁾、連鋳機の設計にも反映出来るようになってきた。

4.3 中心偏析

鋼は合金であるため凝固時にデンドライト樹間でミクロ的な成分偏析が生じることは避けられないが、品質上主に問題になるのは中心部に生成するマクロ的な偏析で、組織異常や硫化物の集積をもたらす、溶接割れや水素誘起割れの原因となる。

中心偏析は凝固の最終段階で凝固シェルがロール間でバルジングしたり、凝固収縮によって溶鋼が流動し、固液界面の濃化液が集まるために起こると考えられている(図8)。前者に対しては、例えばロールの間隔を250mmと狭くして張り出し量を0.1mm以下と小さくして防止している⁴¹⁾。後者に対しては、スラブでは凝固収縮量に見合うように勾配を付けてセットしたロールで軽圧下して溶鋼の吸い込みを防止している⁴²⁾。ブルームでは中央の未凝固部を圧下し易い形のロールで軽圧下を加える⁴³⁾などしている。また、ブルーム連鋳で凝固末期に連続鍛造で強圧下を行い、残溶鋼を絞り出して中心偏析を防止するプロセスも行われている。

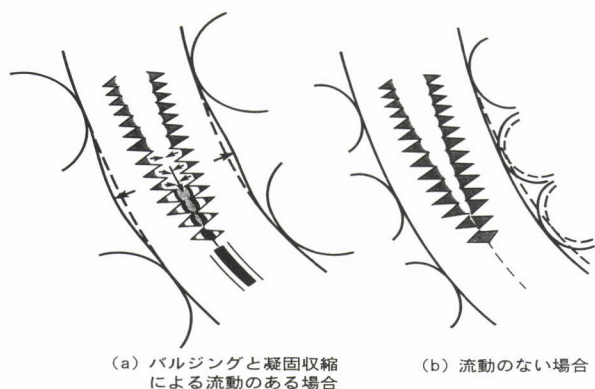


図8 連铸鋳片の中心偏析生成メカニズム (模式図)

るが、濃化液が抜け出して中心部に負偏析部が生成するのを防ぐため、圧下量の調節を行っている⁴⁴⁾。

4.4 非金属介在物

すでに酸素の除去については触れたが、連铸プロセスに直接関わることにについて述べる。

連铸では鋳型内で溶鋼が順次引き下げられて行くために介在物の鋳型内での浮上分離には本質的に不利である。例えば1m/minの引き抜きに抗して浮上出来る介在物は径200 μm と極めて大きい。このため連铸化とともに溶鋼の清浄化の必要性が強く認識され、タンディッシュシールや浸漬ノズル・パウダー鋳込みの採用など空気酸化防止の徹底が計られてきた。

さらにタンディッシュに堰を設けて分離を促進したり、堰に埋めたセラミックフィルターで濾過（付着分離）することが試みられ、介在物数半減の効果をj得ている⁴⁵⁾。

浸漬ノズルからの吐出流部に電磁気力で制動をかけ、介在物が深く侵入して湾曲部に捕捉されるのを防止することも広く行われている⁴⁶⁾。最近では鋳型幅全面に上下二段の制動をかけるなど、さらに工夫がなされてきている⁴⁾。

最近でもタンディッシュ内で電磁気力で回転流をつくり、遠心力を利用して介在物を分離する⁴⁷⁾ など改善が続いている。

5 製鋼プロセスを巡る新しい動き

製鋼プロセスに関わる技術動向を海外を含めて見てみると、新製鉄法など新しい鉄源の製造法と薄スラブキャストイング (TSC)、ストリップキャストイング (SC) など製品により近い形状に鋳込むニアネットシェイプ・キャストイングの動きが活発である。

5.1 新しい鉄源製造法

コークス炉—高炉方式に代わって鉄鉱石と石炭から前処理なしで直接鉄をつくる溶融還元法は、生産量のフレキシビリティの点からも注目されている。海外でCorex法が

稼働しているが、我が国でもナショナルプロジェクトによる鉄浴式のDIOS法の開発が最終段階にある⁴⁸⁾。

一方、国内鉄鋼備蓄量は10億tに達し、スクラップ指向の製鉄法にも関心が持たれている。我が国でも転炉型の炉で石炭粉と酸素で溶解して溶鉄をつくるプロセスが稼働を始めている。溶鉄はその半量を取り出し、脱硫した後転炉精錬を行う⁴⁹⁾。また、熱効率の良いコークス充填層方式のスクラップ溶解法の開発も進められている⁵⁰⁾。

また海外では電炉—TSC方式のミニミルの増加に対応して、スクラップのトランプエレメントの希釈材として直接還元鉄の需要が増大してきている。

以上いずれの鉄源の場合も転炉と電炉が引き続き製鋼の主役を演ずることになる。

5.2 ニヤーネットシェイプ・キャストイング

5.2.1 薄スラブキャストイング

電炉—TSC—簡易圧延機を組み合わせたミニミルの増設の動きが北米等で活発である⁵¹⁾。TSCですでに稼働を始めているプロセスの1つは、ノズル浸漬部のみを広くした鋳型（漏斗状）で50mm厚のスラブを鋳込むもの⁵²⁾で、もう1つは60mm厚の鋳型に鋳込んで内部が未凝固状態から完全凝固した後にかけて40mmまで圧下するもの⁵³⁾である（図9）。これらのプロセスは薄いところへ鋳込むための特殊な給湯法、5m/minの高速鋳造、未凝固圧下、など高度な技術を含んでおり、ここしばらくは製品の用途拡大と相まって技術が発展して行くものと思われる。

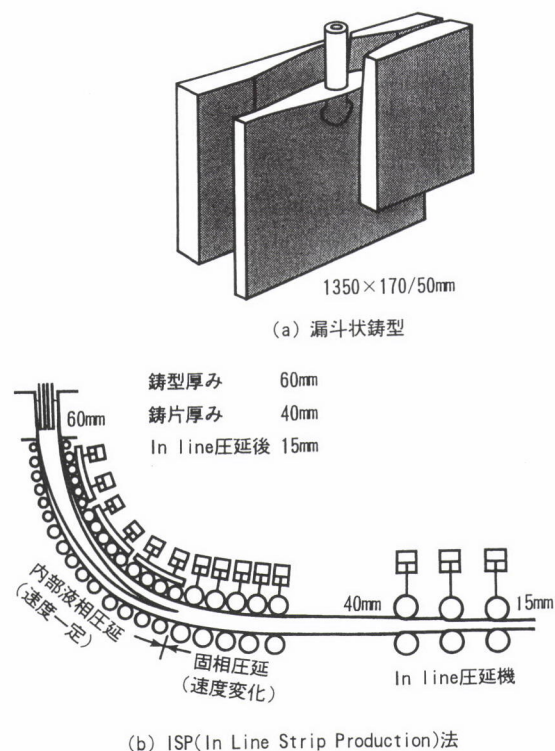
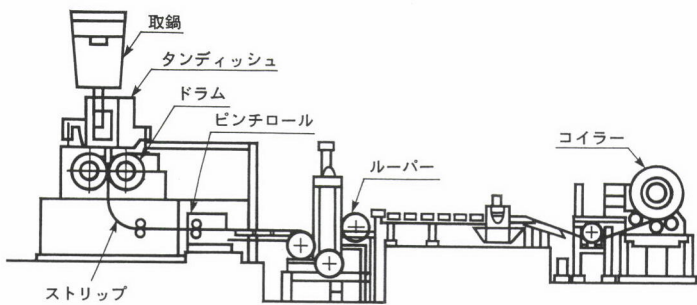


図9 薄スラブキャストイングの代表的プロセス



取鍋容量 10t, 铸造速度 20-130m/min
 ドラム巾 800mm, ドラム径 1200mm, ドラム表面 Cu+Ni
 ストリップ厚 1.6-5.0mm

図10 双ロール法ストリップキャスト

5.2.2 ストリップキャスト

さらに銅片を薄くして最終製品に近い厚みに鋳込むものである。

現在主にステンレス鋼を対象に多数のパイロット規模の開発が行われている⁵⁴⁾が、代表的なプロセスは図10に示す双ロール方式⁵⁵⁾のものである。このプロセスに限らずいずれの方式でも平坦な表面を得るための鋳型(ロール)、ロール耐火物-溶銅の三者の接点、銅片厚み制御など多くの技術課題があるが、順次解決されて来ている⁵⁴⁾。また、製品品質に関しても、18Cr-8Ni銅の微細なしわ(ローピング)や18Cr銅のリジンの対策も提示されるなど、凝固組織-冷延-熱処理の関連での研究が進んで来ている⁵⁶⁾。

ストリップキャストは近代溶銅法を生み出したBessemerが考案した究極の凝固プロセスであり、次世代技術として今後の発展に期待したい。

6 終わりに

製鋼プロセスについて、特に高純度・均質銅の製造に重点をおいて、不純物除去のための精錬と連続铸造での欠陥の防止を主に解説した。

何分対象が広範囲で、誌面の制約から説明が舌足らずになっており、特に読んで頂けたらと思っている製鋼が専門でない方々には判りづらいのではないかと懸念しているが、製鋼を知って頂く取っ掛かりになれば望外の幸せである。

引用文献

- 1) 中沢護人：銅の時代, (1964), [岩波書店]
- 2) 田岡啓造, 多田睦, 山田純夫, 野村寛, 大西正之, 場田一：鉄と銅, 76(1990), p. 1863
- 3) 王寺睦満：第153・154回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1994), p. 1
- 4) 反町健一：同上, p. 103
- 5) 栗林章雄：同上, p. 125
- 6) T. Ikeda, M. Taga, T. Matsuo and S. Masuda : Trans. ISIJ, 21 (1981), p. 433
- 7) 中西恭二, 三本木貢治：鉄と銅, 65(1979), p. 138
- 8) 岸本康夫, 加藤嘉英, 桜谷敏和, 藤井徹也：鉄と銅, 75(1989), p. 1300
- 9) 甲斐幹, 大河平和夫, 平井正純, 村上昌三, 佐藤宣雄：鉄と銅, 68(1982), p. 1946
- 10) H. Kneuppel, K. Boltzmann and H. -G. Fassbinder : Stahl u. Eisen, 93(1973), p. 1018
- 11) E. Steinmetz and H. -U. Lindenberg : Stahl u. Eisen, 90(1970), p. 1517
- 12) T. Obana, H. Ikenaga, M. Tanaka, Y. Yoshida and S. Kourogi : I&SM (July, 1990), p. 21
- 13) H. Nishikawa, K. Kameyama, M. Aratani, Y. Kishimoto, R. Asaho and M. Ohnishi : Sixth IISC(1990), Nagoya, 3, p. 143
- 14) 平岡輝祥：第143・144回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1992), p. 107
- 15) 岩岡昭二, 大橋延夫：鉄と銅, 65(1979), p. 2097および私信
- 16) K. Shinme, T. Matsuo, T. Ikeda, H. Yamaguchi, M. Taga, M. Morishige and K. Kamegawa : Proc. Sixth IISC(1990), Nagoya, 3, p. 128
- 17) 土居襄：転炉製銅法, (1966), p. 120 [日刊工業新聞社]
- 18) P. Leroy, M. Gombert, H. de Larminat, J. Bastien and H. Marion : Rev. Met. 67(1970), p. 181
- 19) K. Brotzmann, W. T. Lankford, Jr. and A. H. Brisse : Ironmaking and Steelmaking, 3(1976), p. 259
- 20) 拝田治, 竹内秀次, 野崎努, 江見俊彦, 数土文夫：鉄と銅, 68(1982), p. 1744
- 21) 川上正博, 伊藤公允：鉄と銅, 79(1990), p. 1791
- 22) T. Ikeda and T. Matsuo : Tran. ISIJ, 22(1982), p. 495
- 23) 松尾亨, 増田誠一：鉄と銅, 76(1990), p. 1809
- 24) 菊池潤, 坂健司, 木村貴司, 尾花友之, 浜名孝年, 長尾興昭：材料とプロセス, 8(1995), p. 1106
- 25) 池田隆果, 藤野允克, 市橋弘行：鉄と銅, 60(1980), p. 2040
- 26) 北村和夫, 竹之内朋夫：融体精錬反応の物理化学とブ

- ロセス工学(1985), p. 291
- 27) 新井学, 渡辺恭二, 中島広久, 松野英寿, 菊池良輝, 石井俊夫: 材料とプロセス, 6(1993), p. 158
 - 28) 奥島敢: 第126回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1988), p. 1181
 - 29) 松藤敏彦, 増田孜, 林田晋, 福本一郎: 材料とプロセス, 6(1993), p. 1004
 - 30) 山崎勲, 渡辺吉夫, 尾花友之, 城田良康, 石田博章, 山中慶一: 鉄と鋼, 73(1987), S161
 - 31) 松野英寿, 村井剛, 石井俊夫, 亀水晶, 桜井栄司, 川嶋一斗士: 材料とプロセス, 8(1995), p. 798
 - 32) 剣持文男: 第143・144回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1992), p. 193
 - 33) 舟之川洋, 和田勉, 森孝志: 材料とプロセス, 1(1988), p. 140
 - 34) 金沢敬, 川本正幸, 村上敏彦, 中島敬治, 中井健: 材料とプロセス, 4(1991), p. 1284
 - 35) 梅田繁, 塚口友一, 三木裕貴, 人見康雄, 川本正幸: 材料とプロセス, 7(1994), p. 302
 - 36) 安中弘行, 山中量一, 井上健, 斉藤忠: 鉄と鋼, 81(1995), p. 529
 - 37) Y. Maehara and Y. Ohmori: Mat. Sci. Eng., 62(1984), p. 109
 - 38) M. Hashio, M. Kawasaki, T. Watanabe, H. Ohtani and J. Maruyama: Tran. ISIJ, 21(1981), p. 8
 - 39) 越川隆雄: 第118・119回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1987), p. 43
 - 40) A. Yamanaka, N. Nakajima, K. Yasumoto, H. Kawashima and K. Nakai: Rev. Met., 89(1992), p. 628
 - 41) 渡部忠男, 佐藤敦, 吉田克麿, 豊田守, 川崎守夫: 材料とプロセス, 2(1989), p. 1146
 - 42) 木村雅保, 斉藤忠, 木村司, 上田輝, 大塚秀樹, 綾田研三, 仙山公規: 材料とプロセス, 2(1989), p. 1154
 - 43) 荻林成章, 内村光雄, 磯部浩一, 前出弘文, 丸木保雄, 西原良治, 沖森麻佑巳, 佐藤哲: 材料とプロセス, 2(1989), p. 1162
 - 44) 小島信司, 今井卓雄, 溝田久和, 藤村俊生, 松川敏胤: 鉄と鋼, 78(1992), p. 1794
 - 45) 野口計, 壺井孝, 竹岡正夫, 栗原健郎: 材料とプロセス, 4(1991), p. 1194
 - 46) K. Takatani, K. Nakai, N. Kasai, T. Watanabe and H. Nakajima: Proc. Sixth IISC(1990), Nagoya, 4, p. 430
 - 47) 三木祐司, 北岡英就, 桜谷敏和, 鍋島祐樹, 小倉滋, 富山淑郎: 材料とプロセス, 8(1995), p. 276
 - 48) 川上正弘, 斉藤健志, 石坂祥, 福島裕法, 北川融: 材料とプロセス, 8(1995), p. 898
 - 49) 大貫一雄, 梅沢一誠, 松本望, 井上隆, 桑原達朗: 材料とプロセス, 6(1993), p. 1028
 - 50) 山本高郁, 宇治沢優, 石田博章, 山岡秀行, 丸川雄浄: 材料とプロセス, 5(1992), p. 1169
 - 51) 杉谷泰夫: 第153・154回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1994), p. 225
 - 52) F. K. Iverson and K. Busse: Metallurgical Plant and Technology International(1991), No. 1, p. 40
 - 53) G. Gisio, L. Manini, C. Maffini and P. Meyer: Proc. First Euro. Conf. on Continuous Casting(1991), Firenze, 2, p. 31
 - 54) 竹内英麿: 第153・154回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1994), p. 253
 - 55) 水地功, 宮崎雅文, 田中重典, 竹内英麿, 福田義盛: 材料とプロセス, 5(1992), p. 1209
 - 56) 上田全紀: 第151・152回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1994), p. 27
 - 57) 玉本茂, 池田隆果, 丸川雄浄: 鉄と鋼, 54(1968), p. 381
 - 58) M. Schmidt, O. Etterich, H. Bauer and H. -J. Fleischer: Stahl und Eisen, 88(1968), p. 153
 - 59) 甲斐幹, 星記男, 上館良興, 山上哲也: 鉄と鋼, 70(1984), p. 680
 - 60) 川名昌志: 鉄鋼界, (1978, 1月), p. 56
 - 61) 真目薫: 学位論文(1993)

(1995年12月20日受付)

現場技術報告

CCにおける溶鋼温度一定化、モールド内流動制御技術

The Technologies to Stabilize the Molten Steel Temperature and the In-mold Molten Steel Flow in Our C.C. Process

新日本製鐵（株）名古屋製鉄所

木村秀明・岡崎照夫・上原彰夫*

石井孝宣・後藤 修・坂本康裕

1. 緒言

表面処理鋼板の需要拡大に伴い、より一層の操業・品質のバラツキ低減を必要とするほど品質の厳格化が進んでいる。この対策として、①タンディッシュ（以下、TDと略す）内溶鋼温度の一定化を可能とする『大容量TDプラズマ加熱技術』と②モールド（以下、MDと略す）内溶鋼流動状況をリアルタイムに把握し、電磁ブレーキモールドなどによるダイナミック制御を可能とする『モールド内可視化技術』を開発し、当名古屋製鉄所第2連続鋳造機に導入した。これらにより、高速鋳造下における操業の安定化・品質の一定化の効果を発揮している。

本報告では、これらの技術の説明とその適用効果について紹介する。

2. 名古屋No.2CCの概要

当社、名古屋製鉄所第2連続鋳造機は、Fig.1に示すように、容量60トンのH型TD適用により鍋交換部でも品質上の継ぎ目レスを実現するとともに、2.4mの垂直部と鋳型内電磁ブレーキの導入により、最大鋳造速度2.5m/min、最大鋳造スループット12トン/minの高速鋳造操業を主体とするホット系専用の連続鋳造機である。

この第2連続鋳造機に、さらに、前記のTDプラズマ加熱とMD内可視化装置を導入、実機化した。

3. 各技術の概要と適用効果

3.1 大容量TDプラズマ加熱

(1) TDプラズマ加熱装置の概要

今回導入したTDプラズマ加熱装置の設備主仕様をTable1に示す。加熱設備は既設のレードル・カー上に搭載した。また、各ストランドの鋳造スループットに合わせ、ストランド毎に独立に出力制御できるように、2本のトーチを設置した。設置位置はH型TDの大型堰出側の上昇溶鋼流動を考慮し、TD2槽目の中央部とした。加熱容量は、鋳造最大スループットと鍋交換部での必要昇熱量などを考慮して、最大出力4.7MWであり、世界最大容量TD加熱設備である。

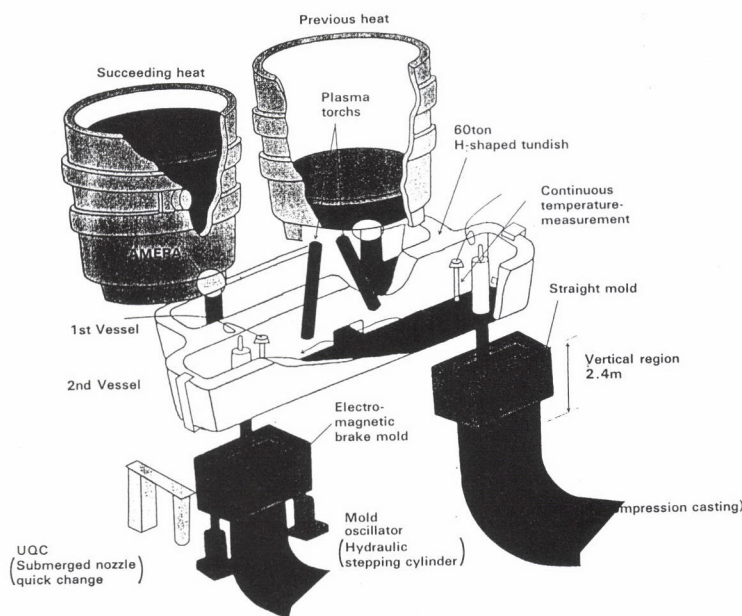


Fig.1. Outline of No. 2 Slab Caster at Nagoya Works.

Table 1. Main specifications of tundish plasma heater.

Type	DC transferred arc
Max. current	5000A/torch×2
Max. power	2.35MW/torch×2
Plasma gas flow rate	Ar 2300 ℓ /min×2 N ₂ 0~30%mixing×2
Cooling water	450 ℓ /min×2

(2) TDプラズマ加熱の適用効果

TD内溶鋼温度は、連鑄操作のみならず鑄片品質にも多大な影響を及ぼす。TD温度が低下すると、浸漬ノズル詰まりが進行し、その結果、湯面変動、偏流が大きくなり、また、鑄造速度変動も引き起こし、鑄片品質が悪化する。TD内プラズマ加熱を適用することにより、TD内溶鋼温度を一定にし、一定温度、一定速度鑄造が可能となる。その結果、浸漬ノズル詰まりも低減し操作バラツキ、品質バラツキが大幅に改善される。

名古屋No.2CCにおけるTDプラズマ加熱操作の実施例をFig.2に、操作形態によるTD内溶鋼温度変動量をFig.3に示す。鑄造条件に合わせ、プラズマ加熱の出力を制御することにより、チャージ内のTD溶鋼温度変動を5℃以下に抑えることができた。さらに、TDプラズマ加熱を適用することにより、Fig.4に示すように、内部欠陥レベルを約半減できた。

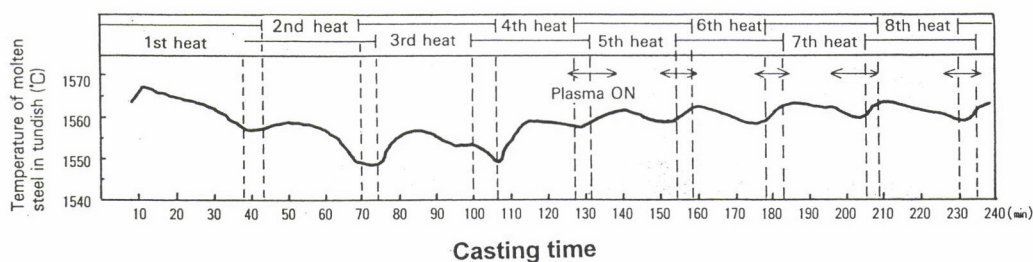


Fig.2. Trends of molten steel temperature in the tundish with and without tundish heating.

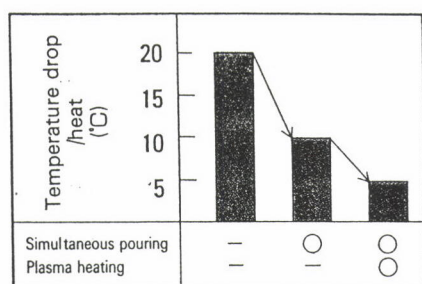


Fig.3. Comparison of temperature drops in a variety of casting operations.

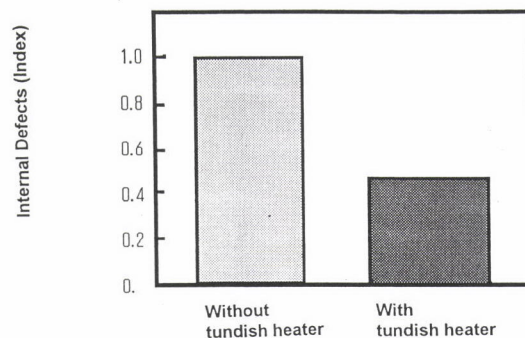


Fig.4. Internal quality caused by inclusions is improved with the precisely controlled tundish heating.

3.2 モールド可視化システム

(1) モールド可視化システムの概要

高速鑄造下における操作と品質の安定化には、生産現場で実際に操作に従事しているオペレーター自身が時々刻々の操作変化を的確に把握するとともに、それぞれの鑄造品種ごとの最適条件が得られるように、リアルタイムに操作を制御することが重要である。当社は、特に、鑄型内溶鋼流動制御がキーテクノロジーであると考え、従来より、その開発と実用化を進めてきた。当所では、約10年前から活用している『オン・コンディショニング・モニターリング・システム』を、さらにグレードアップして、『モールド可視化システム』を構築・実用化した。

このシステムでは、従来の湯面変動量、鑄型内溶鋼偏流量、浸漬ノズル詰まり係数に加え、さらに、各種操作実績値から簡易モデル計算に基づいて、ノズル吐出孔からの溶鋼吐出量、メニスカス部での溶鋼流速、モールド下端での短辺シェル厚み、溶鋼浸透深さなどの多種多彩な鑄型内溶鋼流動に関する情報がリアルタイムに表示される。現場CRT画面を通して、これらのデータをオペレーターは常時、系統的に把握すると共に、操作状況を即断できる。

また、表示についても、情報をより正確に、より総合的に表示するとともに、単なる数字の表示ではなく、その時点での操作状態が適正なのか、異常なのかを瞬時に判断できるように、色分けしたパターンで表示している。

代表的な表示画面として、次の4機能を有している。

- ① 操業統括画面 (Fig.5に示す)
モールドにおける品質・操業の中間指標をすべて把握して、現在の操業状況を総合的に判断し、必要なものについて、最適領域に制御する。
- ② 中間指標トレンド画面
各種の操業指標のトレンド把握により、操業状況を確認する。
- ③ 溶鋼流動画面 (Fig.6に示す)
品質・操業に影響の大きいメニスカス流速、湯面変動量、偏流を制御する場合に、電磁ブレーキおよび casting speed の最適制御を行う。
- ④ 品質直行ビジュアル画面 (Fig.7に示す)
各品質要求に対して、一貫製造プロセスとして、最適な製造条件を铸片毎にガイダンスし、最適制御を実施する。

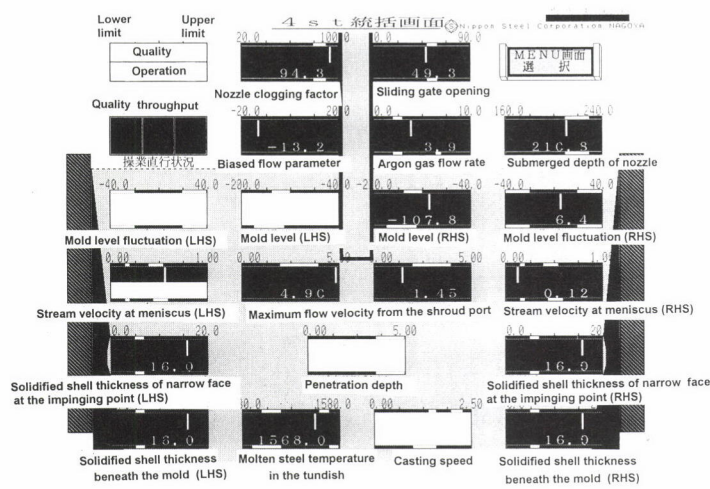


Fig.5. CRT screen image on overall monitoring operation.

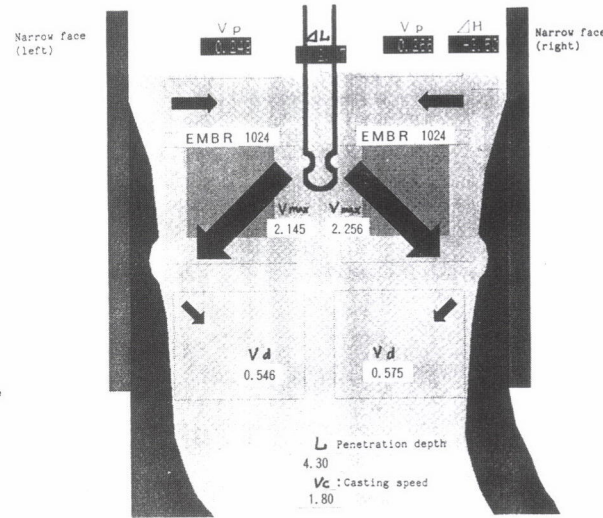


Fig.6. Graphical display on the molten steel flow in the mold.

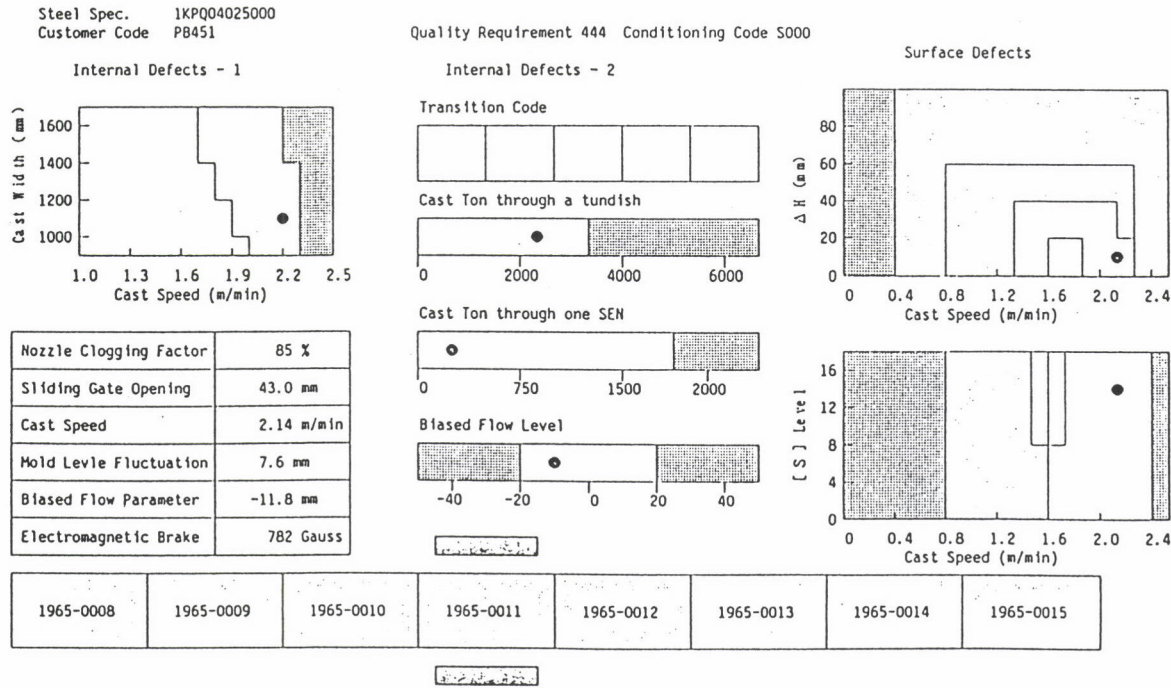


Fig.7. Visual screen of the best casting operation condition for quality throughput.

(2) モールド内可視化システムの適用効果

モールド可視化技術の導入により、操業異常や品質異常となる兆候を早期に検出することが可能となり、この情報に基づいて、前述のタンディッシュ加熱機能、鋳型内電磁ブレーキ機能、鋳造速度や浸漬ノズルアルゴン流量などの鋳込み制御機能を駆使し、品種別最適操業が可能となる。

さらに、このモールド可視化システムに電磁ブレーキ制御を連結し、これにより、鋳型内溶鋼流動の自動制御が可能となるとともに、流動の一定化を実現できた。この電磁ブレーキによる自動制御により、鋳型内溶鋼流動がダイナミックに制御できるため、偏流などの品質上有害な流れを抑制できた。モールド可視化システムに直結した電磁ブレーキの自動制御の実施例をFig.8に示す。この図から、電磁ブレーキの自動制御により、偏流状態が大幅に抑えられることがわかる。

つまり、鋳型内溶鋼流動の様子を監視するとともに、この監視データに基づいて電磁ブレーキなどのオンライン流動制御を適用することにより、高品位の鋳片を高速鋳造で製造できるようになった。さらには、従来の鋳造速度のマクロ的な適正範囲の制約に加え、この種の高精度・リアルタイム制御を適用することにより品質への有害な事象をダイナミックに抑えるとともに、起きないように予防保全的な対策を打つことができるようになる。

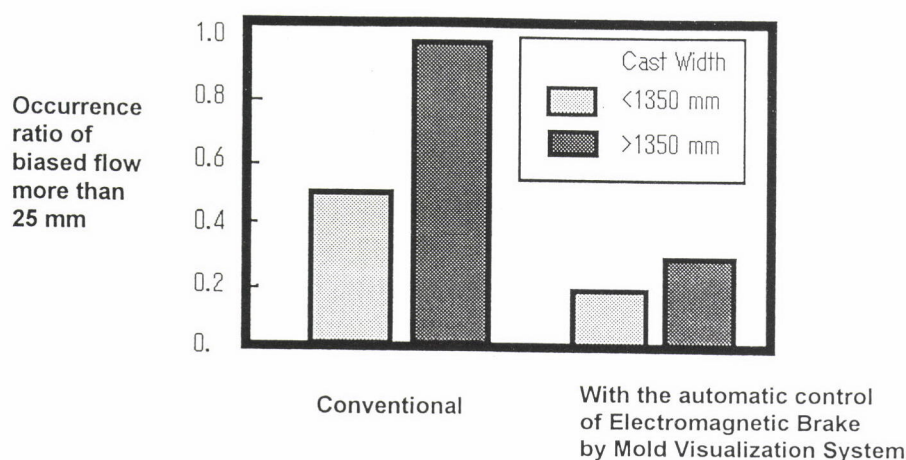


Fig.8. Automatically controlled molten steel flow with this mold visualization system makes the occurrence ratio of harmful biased flow decrease drastically.

4.結言

今回紹介した、4.7MWの大容量TDプラズマ加熱設備とモールド可視化システムを名古屋製鉄所第2連続鋳造機に導入するとともに、さらに、このモールド可視化システムと鋳型内電磁ブレーキを連動し、自動制御することにより、一定温度・一定流動操業が可能となった。これらの技術を活用し、高速鋳造下でも高品質の鋳片を安定して製造できる体制を確立し、現在も品質厳格材の安定製造を継続中である。

現場技術報告

100%水素高対流ベル型焼鈍炉(HCA)の操業と品質

Operation of 100%Hydrogen and High-Convection Bell Type Annealing Furnace (HCA) and Quality of Products

日新製鋼（株）大阪製造所

村上寛・赤見大樹*・相原博行

1. 緒言

近年、省エネルギー、短納期、コストダウンの観点から、連続圧延、連続焼鈍など設備の連続化が進められており、特に普通鋼の薄板分野でその進歩は著しい。しかし、刃物、ゼンマイ、ワッシャー、パネ、チェーンその他自動車部品等に使用されている特殊鋼は、連続焼鈍では加工性を付与する事が難しく、小ロット、多品種という市場の特殊性によってバッチ式のベル型焼鈍で焼鈍を行っている。そのため、品質、生産性、コストの面で様々な問題があった。

日新製鋼大阪製造所では、この問題点を克服するため、高水素、高対流ベル型焼鈍炉（以下HCAと称す）を導入した。現在22ベースが稼働をし、品質、生産性の面でその威力を発揮している。

2. HCA炉設備の特徴

2.1 HCA炉設備の特徴

Fig.1にHCA炉の炉構造、Table1に設備仕様を示す。従来炉と比較してHCA炉の大きな特徴は次の2点である。

- (1) 従来炉の雰囲気ガスがNXガスであるのに対して100% H_2 ガスを使用。
- (2) 雰囲気ガス攪拌用のRCファンが従来比で3.8倍パワーの高対流型。

Table2に H_2 ガスと N_2 ガスの特性を比較する。 H_2 ガスは高熱伝導性、高還元性、低密度、という特性を持っている。この特性を最大限に活用するため炉内雰囲気を100% H_2 とし、後に紹介する様な高能率、品質改善の効果を得ることができた。また、高対流用のRCファンの導入も H_2 ガスが低密度であることからその効果を発揮し、炉内対流伝熱の促進および均一化を図り、あわせてNG原単位の低下を実施することができる。この様なHCAの効果について従来炉との対比で示したのがFig.2である。

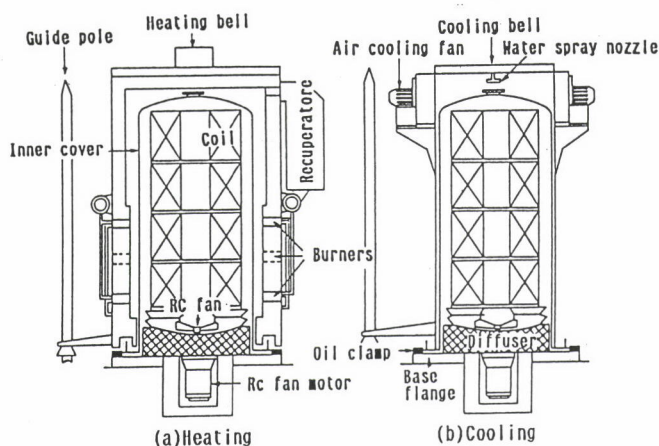


Fig.1. Structure of HCA furnace.

Table 2. Comparison of H_2 and N_2 .

	H_2	N_2
Atomic No.	1	7
Density (g/cm^3)	0.0898	1.250
Viscosity ($10^{-6} Pa \cdot s$)	8.8	17.6
Thermal conductivity ($10^{-2} W/m \cdot K$)	16.82	2.40
Diffusion coefficient ($10^{-3} cm^2/s$)	9.04	126

Table 1. Specifications of HCA.

Heating bell	Bell	Type	bell type Annealer
		Size	$\phi 3260 \times 6085mm$
		Temp. (max)	900°C
		Furnaces	13furnaces
Burner		Burners	9 + 1after burners
		Type	High-velocity type
		Power	$3.77 \times 10^6 J/h$
Inner cover		Size	$\phi 2200 \times 5200mm$
		Material(Thickness)	SUS304(t=6mm)
		Clamp type	Oil Clamp
		Structure of seal	Neoprene round rubber seal
Cooling bell		Furnaces	22furnaces
		Size	$\phi 2357 \times 5946mm$
		Cooling Type	Air & Water
		Furnaces	11furnaces
RC fan		Fan size	$\phi 850mm$
		Motor power	17/32/57kW
		Revolution	900/1200/1800rpm
		Charge weight	60t
Base		Coil size(max)	1800mm
		Bases	22bases

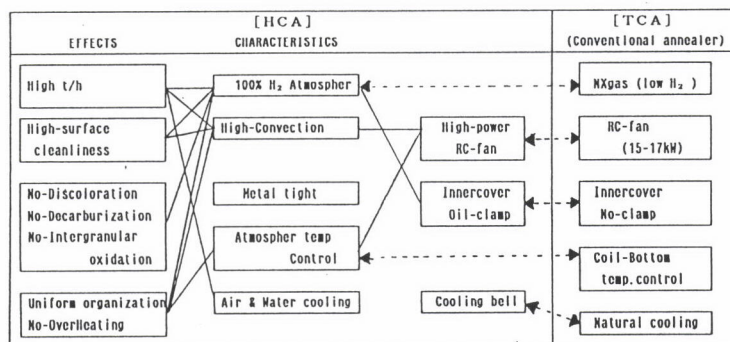


Fig.2. Characteristics and effect of HCA furnace.

1995年12月11日受付 (Received on Dec.11,1995)

* Taiju Akami (Osaka Works, Nisshin Steel Co., Ltd., 2-1-171 Sakurajima Konohana-ku Osaka 554)

3. HCA炉と従来炉の生産性および品質の比較

大阪製造所におけるHCAの導入効果について従来炉と比較しながら簡単に紹介する。

3.1 生産性比較

HCA炉と既設炉の生産性比較をFig.3に示す。炉内挿入重量が47t/チャージの一般的な焼鈍サイクルの場合、加熱t/hで2.02倍、冷却t/hで2.04倍、トータルのベースt/hでは2.03倍の能率アップであり、生産性が飛躍的に向上した。これはH₂ガスの高伝熱性および、冷却時に採用している強制水冷による効果である。この事は、従来から足かせとなっていた、焼鈍でのリードタイムを半分以下に低減でき、全工程日数の短縮による短納期化が達成できた。

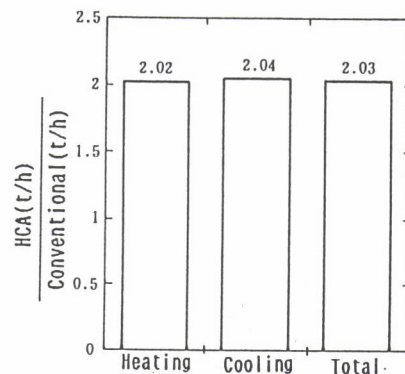


Fig.3. Comparison of production efficiency.

3.2 原単位比較

Fig.4に従来炉との原単位比較を従来炉をベースに示す。NG原単位は、従来炉の89%であり、これはH₂ガスによる熱伝導率アップと高気密性によるエネルギー損失が、抑制されたものと考えられる。電力原単位は、高対流、大容量RCファンを採用したにもかかわらず、70%に減少しており、低密度のH₂ガス負荷軽減の効果が現れたと考える。トータル原単位は、H₂ガスおよびNXガスの原単位増加にもかかわらず5%の原単位低減を達成した。

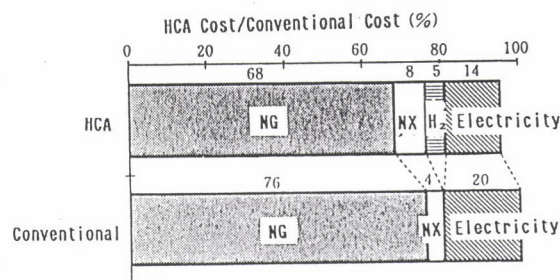


Fig.4. Comparison of utility cost.

3.3 品質比較

3.3.1 焼鈍縞、脱炭、粒界酸化

Fig.5にHCA炉と従来炉での各種特殊鋼焼鈍について焼鈍縞、脱炭、粒界酸化の改善状況を示す。焼鈍縞は熱処理歪、脱炭は熱処理後の靱性低下、粒界酸化は熱処理製品の疲労強度低下を引き起こす原因となる可能性があった。今回HCAを導入した事によって、焼鈍縞は選択酸化の程度及びエッジからの侵入深さもほとんど確認できないレベルまで軽減でき、また、脱炭、粒界酸化もほぼ完全に近い形で抑制する事ができた。これは100%H₂ガスの強い還元力と気密に保たれた炉内雰囲気露点が-60℃以下を達成しているからである。

3.3.2 製品硬さのバラツキ

Fig.6は代表鋼種における従来炉焼鈍材とHCA炉焼鈍材の製品硬さのヒストグラムを示す。HCAは炉内の温度差をH₂ガスの高伝熱性によって低く抑えることができるため、製品硬さのレベルを変化させず、コイル間のバラツキ低減を達成することができた。

3.3.3 板厚変動の改善

従来炉では球状化焼鈍時コイル外周部にオーバーヒートが生じ、次工程での圧延において硬さの差による板厚変動が発生し、板厚精度の面で問題となっていた。しかし、HCAの場合、高対流で循環する雰囲気ガスを温度制御することでオーバーヒートを防止でき、板厚変動を大幅に改善できた。Fig.7に従来炉とHCA炉の圧延の板厚チャートを示す。

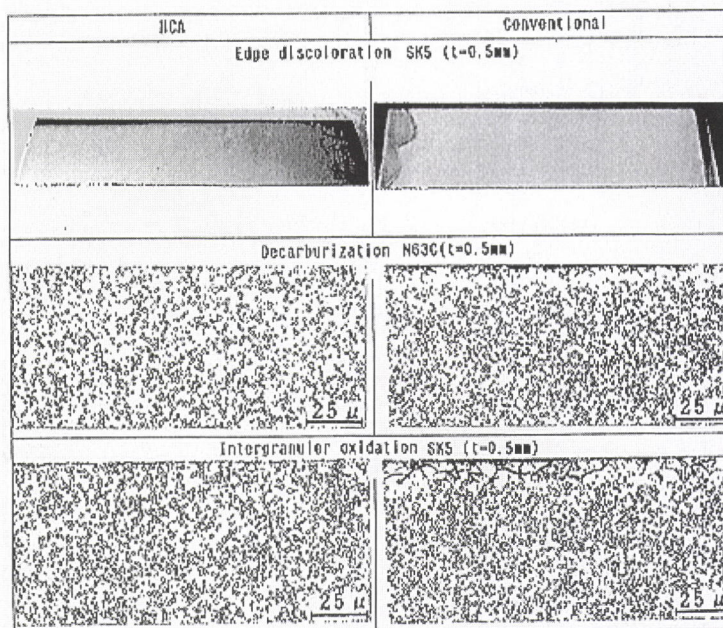


Fig.5. Comparison of discoloration, decarburization and intergranular oxidation.

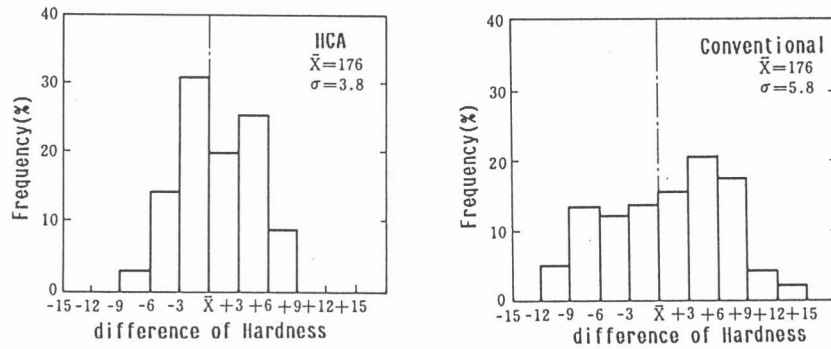


Fig.6. Distribution of hardness deviation.

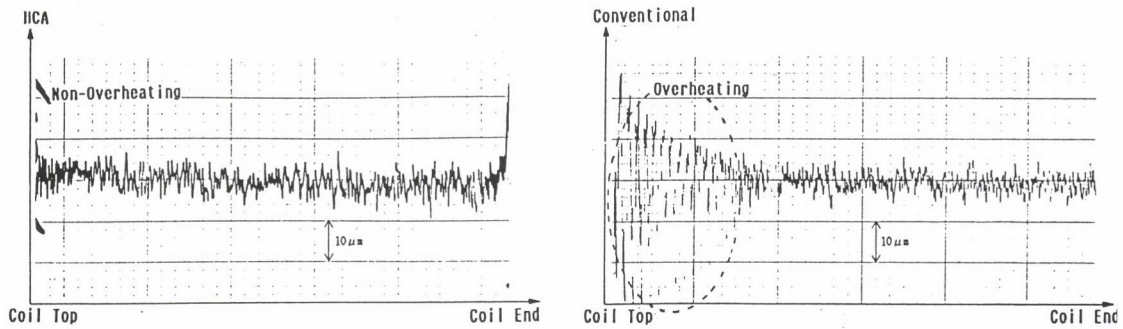


Fig.7. Comparison of thickness deviation.

4. これからのHCA炉の操業について

4.1 最冷点管理システムの適用

HCA炉は従来炉と違い雰囲気ガスの温度管理で制御を実施している。更にHCAは精細な制御が可能であるため、大阪製造所で独自の最冷点管理システムを構築した。Fig.8に最冷点温度予測精度について示す。現在、計算値と実測値の差異は±5℃以内を達成している。この最冷点管理システムを実機に適用することで、更なる生産性向上、原価低減が可能である。

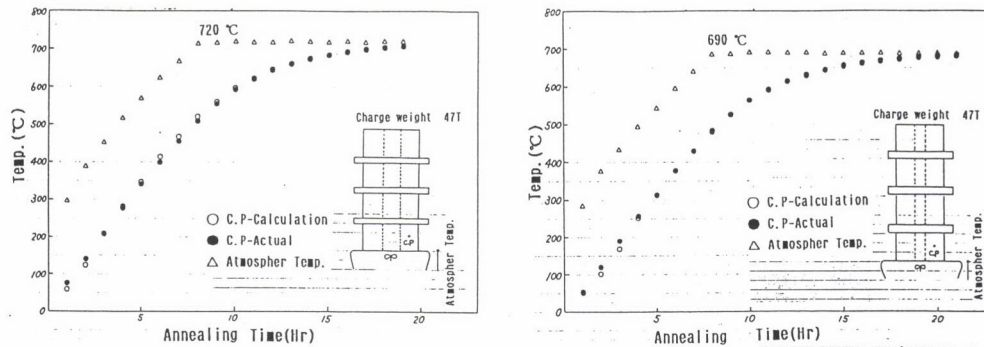


Fig.8. Accuracy of Cold-Point Prediction system.

4.2 製造プロセスの見直し

冷延鋼板の製造における現状の一般的なプロセスは「圧延工程—洗浄工程—焼鈍工程」である。しかし、HCA炉におけるH₂ガスの還元力を利用すれば、洗浄工程の省略が可能であることを確認している。Fig.9は普通鋼において「圧延—HCA工程（洗浄工程を省略）」を実施した鋼板の表面拡大を示した。従来炉において圧延からの直送焼鈍を実施すると鋼板表面の肌はカーボンによって黒く汚染される。これに対してHCA炉ではカーボンによる汚染は認められず現状工程材並の品質が得られることを確認している。

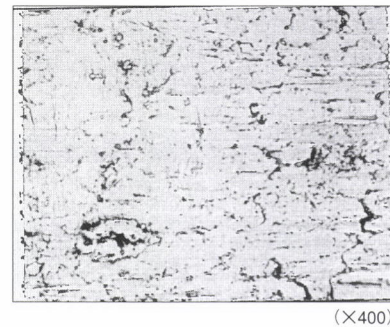


Fig.9. Coil surface of HCA Gas cleaning.

5. 結言

本設備は、特殊鋼の品質向上、生産性アップに威力を発揮し、現在22ベースが順調に稼働している。今後、最冷点温度管理システムの実機適用、製造プロセスの見直し等を推進し、更なる製造技術の改善、新技術の開発に努めていきたい。

現場技術報告

熱延仕上ミルロールバンディングモニタ(RBM)の開発

Development of Roll Banding Monitor in the Hot Strip Mill

(株) 神戸製鋼所 加古川製鉄所

東洵・福田誠・寺井克浩・

吉武邦彦・石丸誠・岩井隆房*

1. 緒言

熱延仕上ミルにおいてワークロールの肌荒れに起因する噛み込みスケール疵は、表面品質上大きな問題であり、その改善が強く求められてきた。しかし、実操業では圧延中にロール表面の肌荒れ進行状況が把握できないため、通常は操業に一定の制約を設けて表面品質を確保している。

当社では、このような問題を解決するため、圧延中のロール表面をオンラインで観察する技術開発を進めてきた^{1)~3)}。その結果、圧延中のロール表面状態を直接カメラで撮像、観察する装置（ロールバンディングモニタ：以下、RBMと言う）の実用化に成功した。本装置の概要と実機熱延仕上ミルロールでの肌荒れ進行メカニズム及びオンラインでの肌荒れの定量化を試みた結果について報告する。

2. RBM装置の概要

Fig.1にRBMの構成図を示す。本装置は仕上ミルハウジング内に設置し、CCDカメラによりロール幅方向任意の位置で圧延中のロール表面の静止画像を撮像する。

操業中のミルハウジング内は、潤滑油などを含んだロール冷却水が飛散しており、ロール表面の明瞭な視野を安定して確保することが最大の課題である。そこで、冷却水による視界の遮りとレンズの汚れ対策として、清浄水の水柱を介してロール表面を撮像している。

回転中のロール表面の鮮明な静止画を撮像するには、ロールの高速回転、振動で画像がブレないことが要求される。そこで、光源にはロールの最大表面周速度などを考慮し、約15 μ s以下のきわめて短い露光時間が実現でき、かつ高輝度出力が可能なキセノンフラッシュ光源を採用している。また、ミルハウジングに取り付けたCCDカメラとロール間の距離変化で焦点がずれることによって画像がにじまないように、磁気変位センサーにより焦点距離を追従させるよう自動制御している。

観察視野は10mm×10mmとし、ロール表面の模様を明瞭に表示できるように、CRTに拡大表示している。

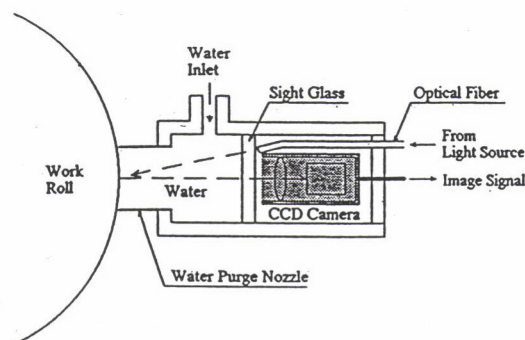


Fig.1. Inner structure of CCD camera box.

3. 肌荒れメカニズムの解明

3.1 撮像結果

Fig.2は、ハイスロールを用いて圧延した後のロール表面を通常のカメラで撮像したものであり、流星状肌荒れと呼ばれる黒皮剥離（写真中の白い筋状部）が生じている。Fig.3は、このロールを抜く直前にRBMで観察したロール肌であり、写真中央部圧延方向に黒皮が剥離して金属光沢部が現れている。これが目視観察時に見えた流星状の肌荒れである。写

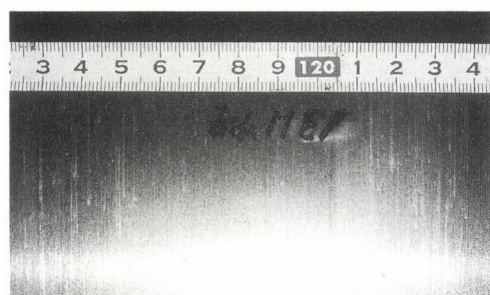


Fig.2. Surface condition of work roll pulled out from mill housing.

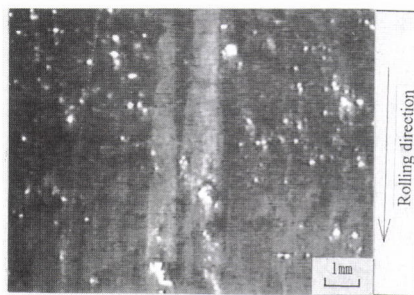


Fig.3. Observation of roll surface by roll banding monitor.

1995年12月4日受付 (Received on Dec.4,1995)

* Takafusa Iwai (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd., Kanazawa-cho Kakogawa 675-01)

真下部に一際白く斑点状に見えるのがピット疵であり、これを起点にして黒皮がロール回転方向と反対方向に剥離しているのがわかる。このことから、ハイスロールの黒皮剥離は、ロール基地組織の粒界に析出する共晶炭化物が欠け落ちることによって生じるピット疵が起因していると考えられる。

以上のように、RBMによる観察結果は目視結果とよく一致している。さらに、ロールの表面性状を微視的に観察しているため、肉眼では観察しにくい小さな欠陥まで観察できる。

3.2 黒皮の生成と剥離

従来から肌荒れしやすい仕上ミルF2スタンド上ワークロールにハイスロールを使用した時の肌変化を調査した。

Fig.4に今回の調査中に圧延した鋼板の板厚と圧延荷重を示す。

Fig.5は、研削後のロール肌を圧延する直前に撮像したものである。筋状の模様はロール研削時に発生した研削目であり、写真中央部の黒く見える部分は、研削中に取りきれなかった残存ピット疵である。Fig.6は、圧延材がロールに噛み込まれた直後のロール肌であり、全面が一瞬にして黒くなり、黒皮に覆われたことを示している。Fig.7、8は、圧延長さ10km以上で板厚1.2mmの軟鋼を数本圧延した時のロール肌である。黒皮がほとんど剥離しロールの基地組織が現れている部分 (Fig.7) や、黒皮がまだらに剥離した部分 (Fig.8) が発生する。次に、肌回復のため低負荷材を圧延すると黒皮が再生して滑らかなロール肌となる (Fig.9)。以降、再び板厚1.2mmの軟鋼を圧延するとFig.7、8同様の肌が繰り返される。

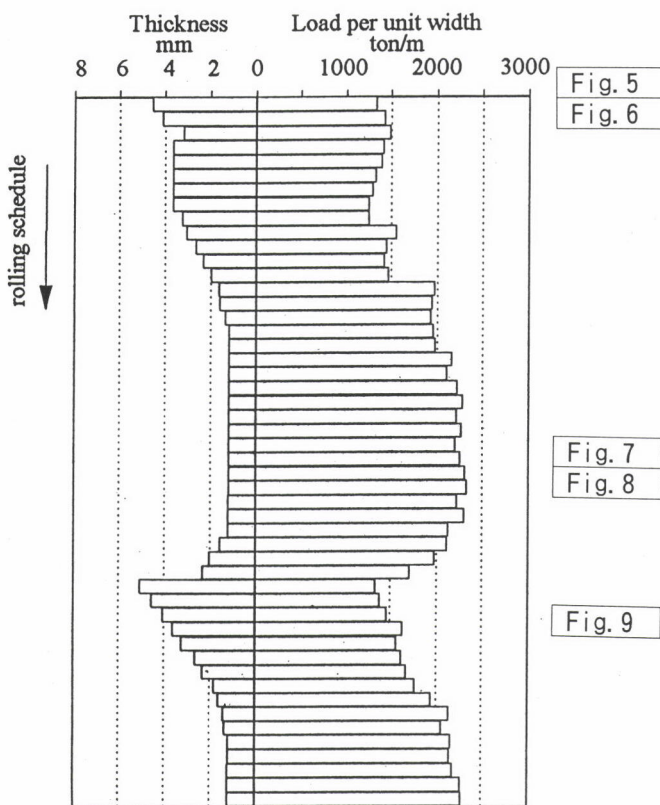


Fig.4. Thickness and load per width in rolling schedule.

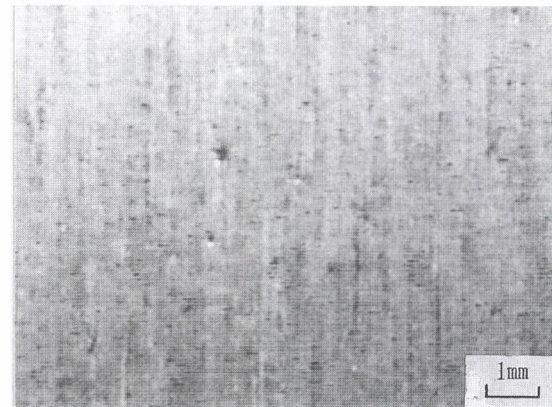


Fig.5. Ground roll surface before first rolling.

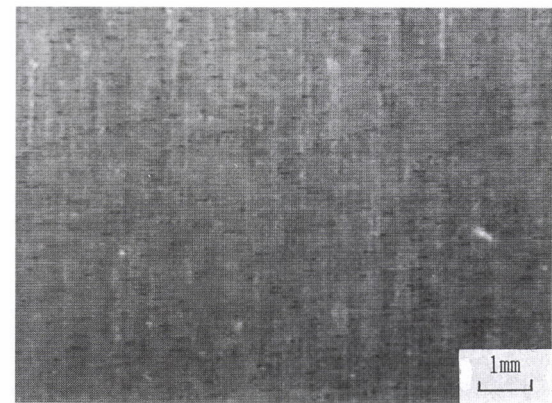


Fig.6. Roll surface just after first rolling.

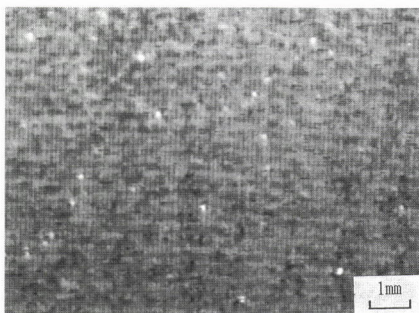


Fig.7. Roll surface of banding area.
(The scale is wholly peeled off)

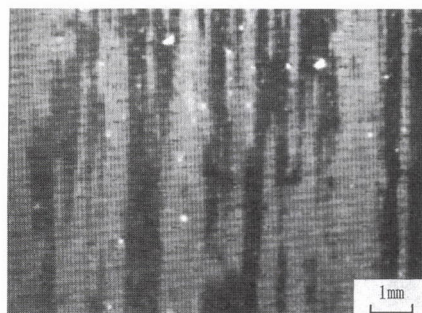


Fig.8. Roll surface of banding area.
(The scale is partially peeled off)

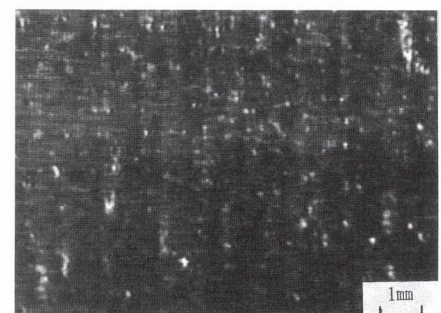


Fig.9. Scale reformation of roll surface after light load rolling.

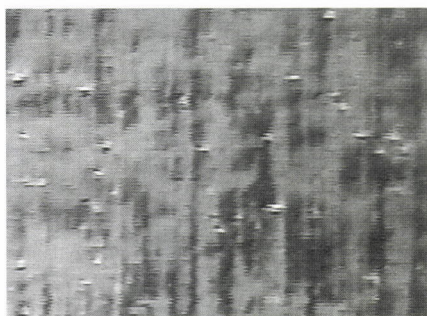


Fig.10. Roll surface of banding area.

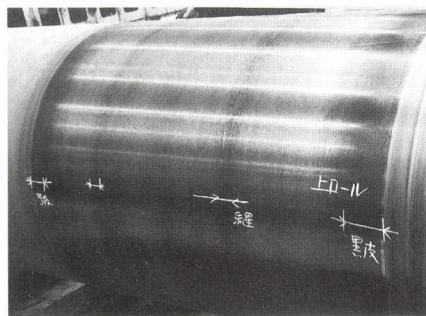


Fig.11. Surface condition of work roll pulled out from F2 stand mill.

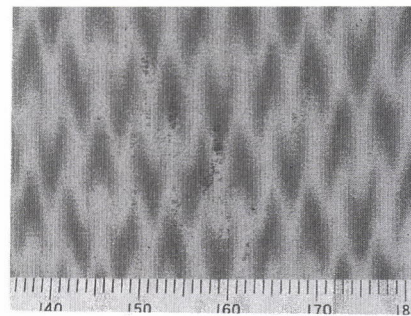


Fig.12. Scale defect on strip steel.

3.3 RBM撮像とロール肌および鋼板疵との対応

RBMによる圧延中のロール肌状況の変化は前述の通りであるが、実際のロール肌荒れ状態と鋼板に発生した噛み込みスケール疵との直接的な対応は不明である。そこで、RBM撮像とロール肌および鋼板疵との対応をつけるため、疵の発生しやすい熱延条件にて実機テストを行った。

実験材(板厚1.2mm)圧延中のRBM撮像、圧延後のロール肌外観および鋼板表面の疵発生状況をそれぞれFig.10、11、12に示す。Fig.10にはFig.8と同様、まだら状のスケール剥離が発生しており、これはロール幅方向の肌荒れ部と一致していた。さらに、鋼板表面にもロール幅方向の肌荒れ部と対応する位置にて噛み込みスケール疵が発生していた(Fig.12)。

この結果から、RBM撮像パターンと鋼板疵とはよく対応することが明らかとなり、今後、RBM撮像にてロール肌荒れ状況を観察、監視することにより、製品の噛み込みスケール疵の大量発生防止に寄与できることを確認した。

3.4 肌荒れ防止策

噛み込みスケール疵の発生原因となるロール肌荒れを防止するため、スタンド間冷却を利用し、鋼板表面温度を下げた時のロール表面状態を観察した。板温の低下によりロール表面状態は従来と異なり、Fig.13に示すように黒皮が薄く、細かなピット疵が散在するような肌で安定し、高負荷圧延を連続させてもまだら状の肌荒れ発生率は従来ほど増加しなかった。これに伴い、製品の噛み込みスケール疵も大幅に減少した。

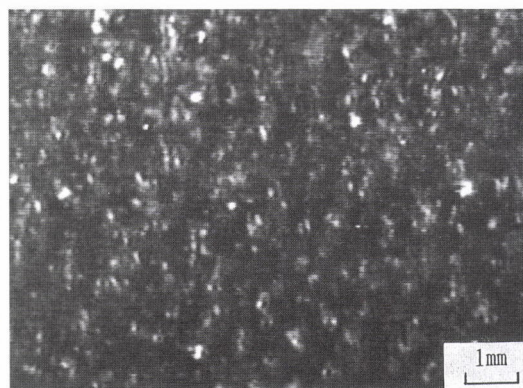


Fig.13. Scale reformation of roll surface after cooling down.

4. 画像処理システムの開発

当社では、バンディング状態の定量化とその特徴量の自動検知を行う目的で、RBMより得られるロール表面の画像処理手法の開発も同時に進めてきた。

これまでに開発してきた画像処理手法の概要をFig.14に示す。

まず、CCDカメラで取り込んだ画像に輝度補正をかけて2値化処理を施す。ロール表面の黒皮部と黒皮剥離部の境界をはっきりしているため、2値化後の画像からこれらの境界を形成している縦横のクラックを接続し、剥離部を抽出(領域分割)する。圧延が進むにつれ、この境界に沿ってバンディングが発生し、ロール母材の組織が現れてくるため、抽出した領域毎の輝度を演算する。最後に、画像全体の輝度分布と、ある輝度以上の領域すなわち、バンディング部分の面積を求める。この結果を、黒皮部との面積比などで時系列的にグラフ表示していく。面積比に注意、警告のレベル判定をつけ、操業者に知らせる。

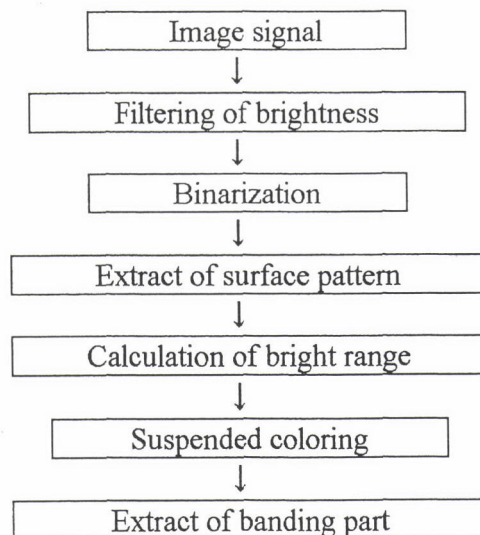


Fig.14. Flow diagram of image processing.

5. 実機での適用状況

熱延RBMは、Fig.15に示すように、1993年6月よりオンラインで開発機として使用開始し、1994年11月に実機化した。本装置は、現在、熱延仕上ミルのF2スタンドに組み込まれ、撮像成功率もほぼ100%で連続使用されている。

また、圧延中のロール肌荒れ状態が監視可能になり、噛み込みスケール疵の低減による製品の歩留り向上に大いに寄与している。

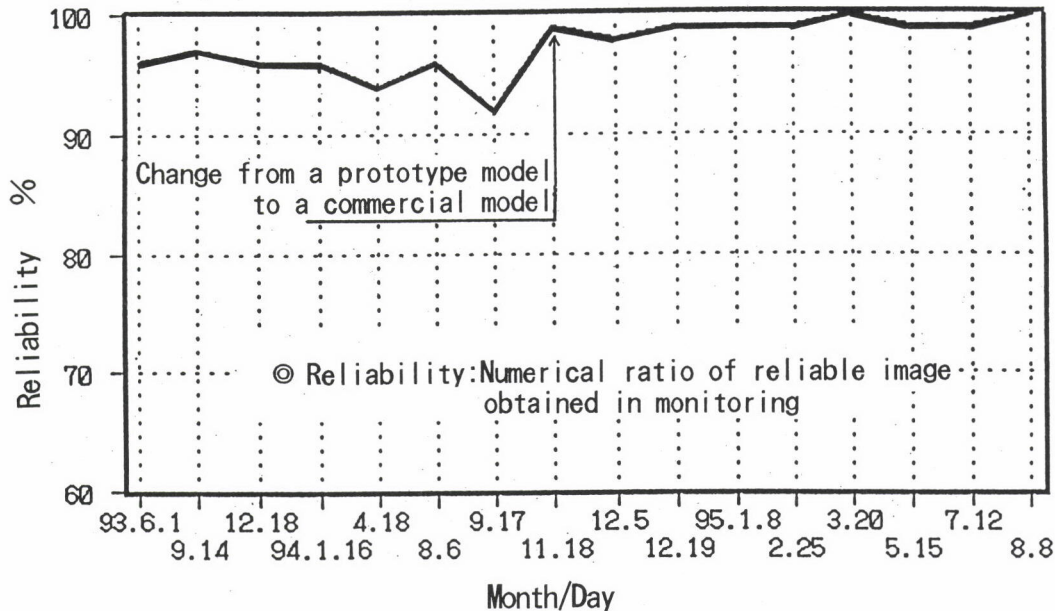


Fig.15. Transition of reliability.

6. 結言

今回開発したロールバンディングモニタは、圧延中という過酷な環境（噴射水、潤滑油、振動）下で高速回転しているロール表面をリアルタイムに非接触で観察、監視することができる。これにより、加熱炉抽出温度、圧延順、各スタンドの圧延負荷配分、潤滑油、冷却水などとロール表面の黒皮生成、剥離、肌荒れ過程との関係が明らかになるため、操業条件の解析、ロール交換時期の適正化などが可能となる。本技術は、製品表面のスケール疵発生の低減、ロール原単位の低減が図れる画期的な手段である。

今後、更なるコストダウンのために、本装置のレベルアップと他のスタンドへの適用拡大を図っていく予定である。

文献

- 1) 安井強、東洵、福田誠、出島勝郎、徳重啓司、西村哲臣：神戸製鋼技報、Vol.43、No.1（1993）、p.109
- 2) 西村哲臣、森本浩史、大池美雄、佐藤準治、東洵、福田誠：材料とプロセス、Vol.6（1993）、p.1324
- 3) 石丸誠：日本鉄鋼協会基礎研究会、圧延ロール研究部会報告書「圧延ロールの技術はどこまで進歩したか」1995年2月、p.131

鉄-21世紀への夢

創立80周年記念懸賞作文入賞作品紹介 ④

日本鉄鋼協会では、創立80周年を記念して平成7年度に懸賞論文を募集しました。全国から寄せられた第1部（中学・高校生の部）195編、第2部（大学生・一般の部）187編のうち、選ばれた入賞作品について順次掲載します。

第1部 2等賞

鉄—21世紀への夢

岡山県岡山市立西大寺中学校2年 石田 沙織

「この最新式のカステールはいかがですか。フッ素トッププレートなんで、汚れが布で拭くだけで落ちるし、温度センサーは付いてるし……。」

丸5年使ったカステールの火のつきが悪くなった。炎がまばらで、鍋底にススが付くようになってしまった。だから新しいのを買うことにしたのだ。

「お手入れはですね、バーナーは鋳物なんでねえ、煮こぼれが付くとサビるんですよ。古園ブラシでこれを落としてやって下さい。それくらいでしょうか。今までのステンレスは汚れたら掃除が大変でしたが、今度のはサッと拭くだけで、簡単ですよ。」

店員は、セール期間中だから安くなっていると言って、母にそれを買わせてしまった。

鋳物——なんか、懐かしい感じ。フッ素だセンサーだってカタカナで最新技術って感じなのに、サビます、なんて言われると、そこだけ昔っぽい。

理科の1分野で、勉強した。鉄がサビるのは酸化だって。教科書を開くと、酸化と還元の説明があって、

一酸化鉄＋水素→鉄＋水

砂鉄から鉄をとり出すときにも、このような還元の反応を利用することができる。砂鉄の主成分は、磁鉄鉱とよばれる鉄の酸化物であるが、昔は、この砂鉄を図のように、木炭と交互に積み上げ、下から空気を送りながら高温に熱し、還元して鉄をとり出していた——とあり、そこに、たたら絵がある。

たたら絵だって分かったのは「日本の鉄」（窪田蔵郎 小峰書店）を読んだから。明治維新前、鉄を作りだすことは大変だったんだろうなあ。

酸化鉄と水素を化合させると鉄と水ができるっていうことを使って、水素吸蔵合金（「鉄の文化」窪田蔵郎 小峰書店）をきっと作りだしたんだね。水素吸蔵合金って金属の粉で水素を運ぶのに使うんだって。すごいなあ。

鋳物一言葉だけ聞いたことがあったイモノ。

とけた金属を鋳型に流しこんで作るものが鋳物で、大きいものは、奈良の大仏様。古いものは、銅鐸や銅鏡。新しいも

のは自動車のエンジン、カーテンウォールなど。この知識は「鋳物の文化史」（石野亨 小峰書店）からなんだ。

いろいろ読んで分かったのは、私が何も知らなかったってこと。

紀元前2000年頃、ヒッタイトが初めて鉄器を使い始めてから、人は、鉄の文化を成長・発展させてきた。人の暮らしを鉄が支えてきた。ある時は破壊の手（戦争兵器）となることもあったけれど、やっぱり鉄は、創造の手だった。

創造の右手が鉄ならば、左手は、エネルギーだ。鉄を作りだすエネルギー、鉄でできた機械を動かすエネルギーも必要だね。18世紀後半のワットの蒸気機関から今日まで、エネルギーの生産技術も、飛躍的な進歩をとげてきたよ。

でも、ここで手ばなしで喜んでいいのかなあ。産業の発展と人口の増加によって汚れていく地球。資源の枯渇も予言されているし。

竹内均「エネルギーの話」（日本放送出版協会）によると、

鉄 240年

石油 31年

石炭 2300年

とある。このまま消費を続けていくと確実に資源やエネルギーはなくなっていく。そこで資源のリサイクルが提唱されて、今よりもっと盛んに行われると思う。鉄だって新しく鉄鉱石から作るよりリサイクルした方が、エネルギー消費量が四分の一、大気汚染が七分の一、水質汚染が四分の一になるみたいだし。リサイクルによって資源とエネルギーの節約と同時に、環境汚染も減らせるよ。

私の住む岡山市でも、ゴミ非常事態宣言がだされ、ゴミを5種類に分類して出さなくちゃいけなくなった。空缶は資源ゴミ。テレビなどの電気製品や自転車は、大型ゴミに出さなければいけない。

阪神大震災後の様子をテレビで見たら、全国から届けられた見舞品を仕分けする作業は大変そう。あの様子は、ゴミを分別する作業みたいだった。ゴミ資源化にかかる費用のうち、一番は人件費だと思うんだ。ゴミは資源だと言うのは簡単だけど、家庭や工場でほとんど分別できていないといけな

思う。電気製品などは、プラスチック類、ゴム類、ガラス類、金属類と大体分解できるようになっているべきだよ。金属製のものもリサイクルを考えた作り方を初めからしておかなくっちゃ。それに、阪神大震災でできたガレキの山をみると、ビルや鉄道、橋などもリサイクルを考えた作り方ってできないかしら。

それと振動を吸収する建造物、プリンみたいに地面が動いても、プヨプヨと揺れて壊れない、そんなものがほしい。

朝日新聞3月11日岡山版に「廃棄物で新港建設」(松永和義氏投稿)という記事があった。製鉄工程の残りがす「鉾さいスラグ」と焼却灰とカキ殻を同じ割合で混ぜると、硬い固形物ができたとある。廃棄物も、新しい資源となることを教えてもらった。それなら溶鉾炉の熱、発電の時できる熱も利用されているのかな。エネルギーは一番、大切な資源なのに、注意しないと、スルッと指のすきまからこぼれおちてしまう。もとは太陽エネルギーからできた石油、石炭。つかまえておかないと宇宙に飛んでっちゃう。エネルギーもリサイクルできるといいな。夢のような話だけど、クーラーの室外ユニットぐらいの大きさで、エネルギーリサイクル装置が各家庭にあったらな、と思ってるんだ。昼間は太陽エネルギーを蓄え、室内からでる、熱エネルギーや光エネルギーも蓄える。工場はエネルギーをたくさん消費するけれど、また、たくさんエネルギーを蓄えることもできるんだ。生産現場で、消費生活でエネルギーもリサイクルするの。

中学校の先生が「中国の経済開放政策で金持ちになった中国人の子供の修学旅行先が、東京ディズニーランドで、費用は五十万円、こづかいが二、三万円で、それでも少ないっていうんですから。中国十二億人が、今の日本の生活、一軒のうちに車二台、各室にテレビがあるって生活をしたら、地球は終わりですよ。」と言っていた。その言い方に差別があるみたいでイヤだな。でも、発展途上国の人々が日本人と同じような資源やエネルギーの使い方をしたら、資源はすぐなくなるし、環境汚染はいっぺんに進むし、先生の大げさな言い方「地球の終わり」も本当になるかもしれない。

じゃあ、先進国だけが今のやり方を続けていいっていう訳では、もちろんない。誰にでも快適で豊かな生活を望む権利はあるんだ。

それじゃあ、どうしたらいいのか。

徹底的なリサイクル、そして新技術開発だと思う。またま

た夢のような話になるけど、膨張しない鉄、または金属が作れないかな。膨張しなかったら機械の精度があがり、生産性も伸びると思う。

反対に、膨張率がものすごく大きいっていう金属もできないかしら。雑誌で見たんだけど、スイスのジャガー・ルクルト社製の置き時計には、ネジも電池も使わないものがあるんだって。一時計の文字盤の後ろにドラムがあって、その中に膨張係数の大きな金属が入っている。部屋の温度変化で、金属が0.001%分伸び縮みするその力でネジを巻く。自然の変化を利用した、一見永久時計なのです。—と説明があった。特別に作りだしたエネルギーを使わないで、素材のもつ性質を利用して動く機械を作ってほしい。

そして最後に、バクテリアを使って新しい資源、それは鉄でもいいし、エネルギーでもいい、はできないかな。

—1977年、ガラパゴス諸島沖の深海で熱水鉾床が発見された。その裂け目は、粘土質の鉾物、硫酸化した鉾物からできていて、そのふきあげる熱水(400度)の中にチューブワーム(赤い管状の虫)も発見された。このチューブワームの体内には、硫化水素を使ってエネルギーを得るバクテリアがいる。チューブワームは硫化水素をバクテリアに与えて、バクテリアからエネルギーをもらう。だからチューブワームは硫化水素を無毒化する。

また、シアノバクテリアという藍藻類は、太陽の光を使って水と二酸化炭素から養分を作り出す。「まんがNHKスペシャル生命第一巻」(小学館)に書いてあったよ。ニュージーランドの火山島ホワイトアイランドには100度の硫化水素の熱水の中で生きるバクテリアがいるんだって。そんなバクテリアを化学工業や鉄工業にも利用できないかなあ。

四十億年前に生命が誕生し、進化し、ある種は絶滅し、ある種は生き残って今があるんだよね。昔、生きてた生命の種の99.999%が今はいないんだって。今、地球に三千万種の動物や植物が生きているよ。その生命の種のひとつ、人の先祖は四百万年前に生まれて、鉄を使いだして五千年になるんだ。地球の歴史を考えると、人が創りあげた文明なんて、ちっちゃいものに感じるね。

その文明が、たくさんの生命を抱えてる地球をメチャクチャにしていはいはづがない。宇宙的な視野から、これからの文明(もちろん鉄が支える)を、私たちは創りだしていくんだ。

第2部 3等賞

ニューメタルの勝利
—愛染鋼太郎の研究記録より—

奈良県北葛城郡

河村 瞭司

はじめに

本年（1995年）2月に新聞、テレビが「フィリピン沖の海底で発見された金属塊は金あるいはプラチナではなくただの鉄で、値打は邦貨で約6万円程度である。」という事実を報道した。いわゆる「山下秘宝」の一つの結末である。

財宝発見にまつわる話の落ちとしてありがちなことだが、ちょっと引っかけたのは「ただの」鉄という表現である。鉄はただのといわれるほどつまらん物なのか、と思う。なるほどフィリピン沖に限らず太平洋には、大戦で沈められた無数の艦船が武器弾薬を積んだまゝ英霊とともに海底に眠っている。また島々にも波打際やジャングルの奥に多くの戦車や大砲の類いが、無惨なスクラップになって今なお霊魂とともに放置されている。なくてはならぬ鉄が役目を果たし終わったこの姿に誰も関心を払おうとしない。世界的な、そして地域的な戦争に終始した20世紀の暗い象徴と云えよう。

鉄は人類の生活を向上させ、豊かにしてきた。しかし、当初は生きるための糧を得る道具として使われていたのがやがて人に対する武器に変身し、より優れた武器たるべく求められたことにその悲劇の原因がある。以来鉄の武器、武具は為政者の野望や血迷った無法者の道具として使われ多くの人がその犠牲になった。悲劇は今も何処かで演じられている。

もう悲劇は十分だ。これからの鉄の使命は、人を傷つけるのではなく、人の命を常に救い、さらに人の世を豊かにするものでなければならないとつくづく思う。

1. ニューメタルの誕生

愛染鋼太郎は、車のハンドルをしっかりと握りカーナビゲーションのディスプレイにちらと目をやって前方を見つめた。慣れている道だったが、今日は永年の研究成果を重役諸公の前に発表する日なのだ。テレビ会議ならわが家で説明できるのだが、社長がどうしても鋼太郎が開発したニューメタルのサンプルを皆の手に触れさせたいというので、役員を一堂に集めることになったのだ。

早目にその会議に間に合うよう家を出たのに、気が急ぐのにまかせて事故でも起こしては何もならない。日頃その名に因んで「銘刀」とあだなされている彼は、何事にも慎重でしかも一旦決断すれば大小の障害を切り捨て薙ぎ倒して進んだ。知る者をして「味方につければ百万力、敵にまわすとコワイ人。」といわせるゆえんである。

予定通り会社に着き会議室に入った。円卓には既にスチー

ルペーパーに印刷された資料が配られており、所在なげに待っていた研究部長の酒樽銃三が「ヤァ」と片手を挙げた。

「準備はいゝね。」

「はあ、ま、何とかいけるでしょう。」

「まだ五分ほどある。ちょっとレジメをやっておこう。今日のさわりを云い給え。」

資料も見ずに鋼太郎は説明を始めた。

「このニューメタルは従来の鋼が持っている剛性とゴムの特質である可撓性ととの融合を基本とし、その比率は自在にできます。比重は普通鋼の約4割、引張強度は熱処理条件によって段階がありますが最高はスーパハイトンの約2倍です。繰り返し強度試験をした結果では塑性変形を起こしません。熱的には融点は1,540℃、1,400℃程度まではクリープは見られませんので、耐熱度はほぼこの温度と云えます。しかも加工が楽で、冷間で厚み25ミリの板を1パスで0.5ミリ以下に圧延できる。残留応力は0に等しい。基本的な特性はこうした内容です。さらに新しい機能として、200℃までの低温熱処理で電気抵抗値の調整ができることです。つまり加熱温度と電気抵抗が反比例します。常温では鋼の抵抗値に近いが100℃で70%減、150℃を超えると無限に0に近くなります。一度この特性を与えると再加熱しても変化しません。複雑な形状でも加工してから熱処理できるので、製品によってはプロセスが極めて簡略化されてコストの低減幅は大きいと予想されます。ほとんど常温超伝導の領域に入ってきたと思います。

製造コストは量的な関係もありますが、通常のステンレスよりもやゝ高目かと考えています。粗鋼自体が今は高炉や電炉からでなくリダクションマイニングでうんと低コストになっていますから、かなり期待できるでしょう。……

ざっとこんなところですよ。鋼であって鋼でない異質の『メタル』なんです。」

「うん、先ず軽いこと、硬さと柔らかさの共存、加工のし易さ、高い耐熱性、それに加えて超伝導性だな。それに低コストでもある。」

酒樽部長は満足気にまとめた。

「ところでサンプルは？」

「これです。テストピースにしましたが、ほれ、これはこんな風に曲がりますよ。」

鋼太郎が差し出したサンプルを手にとり酒樽氏は暫く考えていたが、ふと気づいたように、

「経年変化についてはどう云う？コンピュータ通りの説明で

行くか。』

「いゝえ、酸、アルカリでの加温浸漬テストをこの一年しました。その結果ではいずれもかなりのpH値に対して侵食痕はなく、強度や伝導性も変化は見られません。」

「じゃ、ほとんど問題なしだ。詳しい組成や製造プロセスを訊かれたらどう答えるかね？パテントを出した段階で関係者はある程度知っているが…」

「その点は今までと変わりません。製品が市場に出てもミソの部分は人工頭脳に収めておいて外には出しません。」

「うん、それがいいだろう。」

役員たちが入ってきた。二人は互いに指でOKマークをし合って席に着いた。

鋼太郎のペースで会議は進められた。いろんな角度からの質問にもポイントを外さず明快に答えた。用途を問われれば大は高層用建材や超伝導材、小は幼児の玩具に至るまでと答え、製品化の難易を訊かれれば長尺のワイドフランジH型鋼から小物部品やビスに及ぶ広範な例を挙げた。

そのサンプルを手にして出席者はためつすがめつ確かめ、挙句にはそっと歯で噛み硬さや触感を確かめる者もいた。最後にはこの夢のニューメタルの商品名の決定と対外発表、そして一日も早く市場に出す方針について大まかなスケジュールが論議された。

終始熱心に聞いて質問をしていたのは金銅社長だった。70才に手がとゞくとは思えぬ若さがこの人には秘められている。会議の締めくくりに金銅社長は立ち上がり一席ぶった。

「ニューメタルがいかに素晴らしいものか、諸君は分かったと思う。わが社の社運を賭けてこの新製品を世に送り出したい。」

思えば20世紀末に阪神大震災というのがあって多くのビルや家屋が倒壊し、5,500人近い犠牲者を出した。被災者は30万人に及んだ。記録によればわが社の関西製鉄所も酷い被害を受けた。私は当時中学生で千葉にいたが神戸の縁者を失った。救援の手伝いに行って倒れた家屋やビル、高速道路を実際に見たが、その凄まじい光景は生涯私の脳裡を離れない。そして震度7を超える地震にも耐える、もっと強くて撓みや捩れにも十分な耐久性を持つ鉄を造りたい、とその時思ったのがこの仕事についた動機だ。

その悲願も、今日愛染君の発表を聞いてようやく叶えられたと心から喜んでいる。強いばかりでなく超伝導性に関しても夢が実現する。これこそ21世紀半ばにできた『人類への最大の贈物』と云えよう。より一層諸君のご協力を期待する。」

と、涙をこぼさんばかりに嬉しそうだった。

鋼太郎はかねがね祖父母から聞いていた50年以上も昔の大震災が、少年だった金銅社長にそんな動機づけをしたことは初耳だったが、地震国の日本では常識を破る震度の地震がまたあるかも知れない、その時にこそこのニューメタルの真価が問われるのだ、と技術者としての武者振いに似たものを覚えるのだった。傍で酒樽部長は、自分も面目を施したとばか

りに、今宵の酒宴を早くも心待ちにしていた。

2. 紙と布になった「鉄」

さすがに鋼太郎は酔った。あれから社長が云い出して、鋼太郎へのねぎらいとニューメタルの輝かしいデビューの前祝いをしたのだ。賑やかな一次会のあと鋼太郎は社長愛用の店に伴われた。ひとしきりグラスを傾けてから社長は鋼太郎に云った。

「鉄は面白いよ。熱すれば柔らかくなるし、しっかり叩けば薄くも長くもなる。真っ赤なのを水で冷やすとうんと堅くなる。ちょっと異質な物を入れると、まるで別人のようになっちゃう。まあ惚れた女性のようなものだ。熱い気持ちで当たれば向こうも応えてくれる。」

堅くてシャープであっても鋼太郎も人の子、社長の鉄—女性論は含蓄のある話だと思った。

ふと、今朝家を出る時妻の垂苑が見せた美しい笑顔を早く帰って見たい、という思いに駆られた。そんな彼の気持ちを見透かしたように金銅社長は微笑を浮かべて続けた。

「昔と違って今は鉄も鋼もいろんな所に使われるようになった。昔なら想像もしなかった使われ方だ。代名詞だった冷たい、堅い、重い、は製品によっては逆になっている。木材に取って代わるようになってもう20年近いからね。今じゃプラスチックやセラミックスはおろか、紙や布の領分にまで入り込むようになった。たとえば今日配った資料のスチールペーパーだ。このナプキンもそうだ。出始めて3年になるが、これは君も知ってるように鋼を極細の繊維とし有機処理でセルローズ化している。見た目には紙と全く変わらない。まだ紙独特の手触りには程遠いが紙に比べての利点は、破れない、燃えない、水に強いといったところかな。いやまだある。保水性は紙よりも大きい。究極の毛細管だ。それから私のこのスーツ。これも鋼だ。昔は服に鋼を使うといえば鎧兜か防弾チョッキぐらいだったが、今はそうじゃない。れっきとした服だ。しかも着易い。日常の物にこんなに鉄が進出してくると、次は何ができるかと楽しみだよ。」

次はエネルギー分野ですよ。エネルギーを食った鉄が、それ以上のエネルギーを生み出すようになりますよ……と口に出しかけた言葉を鋼太郎は飲みこんだ。酔った勢いでしゃべることは厳に慎まねばならない。新製品や新技術を巡っての企業各社の競争は、どこの業界にあってても熾烈を極めているのだ。自社の存廃がたった一つの新しい技術や製品にかかっている現状なのだ。他社が何を開発しているのか、どんな新技術を模索しているのかに関する情報を関係者は血眼で求めている。壁に耳あり、^{あぶない}剣呑々々。

社長の云う通り、鉄の利用分野はかつての常識を超えた広がりを見せている。2030年代までは建築、橋梁、輸送、機械、電気などに代表される用途が主流だった。前世紀に鉄の新しい用

途開発と騒がれたのが例えば石油ライン用のシームレスパイプ、自動車用長ライフ耐食銅板、高透磁率特性を持った珪素銅板、電子機器用電磁波シールド材などで、この他にも希土類磁石、超合金など多数あったがいずれも素晴らしい改良、改質の成果は挙げたとはいえ鉄の固定観念を乗り越えて他物質に大きく取って代わるものとはいえなかった。そして今世紀になってもこれらを基にした派生品にとどまっている。

その壁を最初にぶち破ったのが、「鉄（鋼）の紙」（商品名 テッシ）だった。確かにこれは鉄が他の異質な物の領域に踏み込んだ最初だった。鉄と紙—正確には鋼と紙の質的融合は文字通り常識を超えるものとして鳴り物入りで歓迎された。しかし、本来紙は紙なるがゆえに破損し、焼かれたり朽ち果て、消耗するのが良いので、いつまでもなくなる鉄紙はデビュー時の珍しさが収まると潮が引いたように人気を失った。既に普及している親酵素澱粉から造られた自然分解紙が弱くて脆かったために反動的に得た人気は、単なる流行の寵児に終わるしかなかった。たゞ、その技術的挑戦は月に印された人類の最初の一步と同様不滅の栄光を与えられていた。

次いでこれの技術的パイロダクトとして登場したのが、鉄繊維化をベースにした「鉄の布」（商品名 テクス）だ。だがこれもテッシと同様の評価に落ち着いている。

大きな事件があるたびに資源の保護、廃棄物の再生が云われるのだが、すぐその熱は冷める。いつの時代でも大衆が好むのは結局消耗だと思えない。

こうした流れの中で、ニューメタルの次に銅太郎が目指したのが「光発電」電池であった。

3. エネルギーを創造する鉄

太陽光発電の開発は、前世紀から電力会社を核に関係各社が熱心に続けていた。

2030年代には発電効率も漸く20%を上まわるようになったものの、キロワット当たりの電力コストは普通の電力に比してなお5割高かった。公共・福祉施設、離島などでは差額を政府が負担することで利用度が高まり、今や全発電の3割に近い量を太陽光発電が占めている。しかし高度に発展した社会の電力消費はとどまることを知らなかった。

政府のエネルギー需給見通しは甘かった。最大消費時に供給が息切れする問題は今も解決していない。安全性の高まった原子力発電が主流であり新エネルギーによる発電は、太陽光以外には燃料電池が小規模に利用されている程度で、核融合はまだ試験段階である。勿論火力は炭酸ガス排出規制で今や国内では2ヶ所が残されているのみだ。不足分は光発電でと政府の力の入れようは並々ならぬものがあった。

銅太郎の狙いはこの光発電コストをもっと下げて原子力発電と同程度かそれ以下にし、最終的には余剰電力の売電で設備の償却とメンテ費用が賄えるようにすることにある。そのためには先ず太陽電池がうんと安くできなければならない。

未だにコストの高い高純度シリコンを使っているが、これを「鉄」にすれば驚異的に安くできる自信があった。その手法として、高々純度の鉄を単結晶化し、磁気特性を制御して電界反応を条件化する研究を主眼にしようとしていた。

2種以上の物質の合成や合体に対し、本質的な個々の物性の違いをどこでクロスさせどう融合させるか、彼はそれを丹念に積み上げる手法で新しい型破りの開発をしてきた。

電池にはニューメタルの開発技術がかなり応用できそう。3年、いや5年にかかるかも知れないがきっと実現してみせる、と銅太郎は酔い心地の中で昂ぶっていた。

わが家に帰ったのは深夜だったが、妻の亜苑の暖かい笑顔に迎えられて銅太郎は今日の上首尾を言葉少なに、しかし明るく告げた。

4. 「鉄」は食えるか？ 飲めるか？

広いラウンジの窓から青空が見えている。食後のコーヒを味わいながら銅太郎は浮かんでいる雲をぼうと眺めていた。肩を叩かれてわれに返った。酒樽部長の笑顔があった。

「どうした？ 疲れが出たかね。」

「いや、ちょっとぼんやりしてたもんで。」

銅太郎は、前に座った酒樽氏に云った。

「それより今日は少し顔色がすぐれませんか、どうかしましたか。」

「あゝ、多分呑み過ぎだろう。このところペガサス（ニューメタルの商品名）の宣伝、販売のことで営業やクライアントと飲むのが多いから少々キモが疲れているんだ。」

名は体を表すの喩え通り、酒樽氏の酒好きは定評があった。休肝日を作ることが大事ですよ、と云う医者^の忠告には耳をかさずひたすら飲み通していた。彼には酒あってこそ日々のそれでいて元気だったが、さすがに臓器疲労を来したのか顔にそれが出ている。

「薬を飲んでますか？」

「医者のは飲んでいないが、最近こんなものを勧められて少し飲んでるよ。」

酒樽氏がさし出したのは掌に入る小さな瓶だった。ラベルに「クロロン」と書いてある。

「新薬だ。肝臓に良いそうだ。血液に吸収されて新陳代謝を促進するそうだ。」

「そうだ、そうだ、って他人^{ひと}ごとのように云いますが飲んで効いてますか？」

「効くんだろう。葉緑素が主体で鉄分が加えられているから胃にも血液にも良からう。」酒樽氏は淡々と云った。なるほどクロロンとはクロロフィルとアイロンか「葉緑素と鉄分」とは古典的な成分だな、しかし鉄分が一錠当たり300ミリグラムとは大変な分量だ、と銅太郎は思った。鉄分は昔から血液中のヘモグロビンとの関係から摂取が勧められている。だ

が食べ物から自然に摂取されるのと違い、人為的に摂る場合体内で有効に吸収される仕組みを工夫することが先決とされている。

鉄分の効用は、一世紀余も続いている漫画の主人公「ポパイ」の最大の見せ場だ。ほうれん草を口にした途端モリモリとエネルギーになるのは、それに含まれている鉄分の効用を誇張したジョークに他ならない。ではあってもその人工合成が大規模に計画されなかったのは極めて困難だからか、あるいは無機物の鉄を食料として有機物化することは不可能だという常識の壁が厚いからなのか、鉄紙並みでは駄目かと鋼太郎は考えていた。

「これだけの鉄分が完全に有機化されているんでしょうか？」
「どうかな。どういう状態をさして有機化と云うのか分かんが、単なる錯イオン化だけではないだろう。自然の食べ物に含まれているのに近いものにしてあると思う。」

酒樽氏もよく分からないのかあやふやだった。しかし有機化できているとすれば、このクロロンだけでなく他の葉にも、いや食べ物、飲み物全般にその手法が応用されていても不思議ではない、どうして自分は気づかなかったのかと鋼太郎は思った。古くからカルシウムや微量のカリウム、マグネシウムなどが葉に使われているが、量的にかなりの鉄がそのまゝ含まれていることは珍しい。体内吸収はどの程度なのだろう。

部屋に帰った鋼太郎は、製薬会社にいる友人の備田明司をテレビ電話に呼び出した。

「鉄のオーソリティでも分かんかったか。鉄に限らんけど微量金属を体に吸収させることは公知の事実やで。たゞいっぺんに300ミリグラムもの鉄を摂っても、えゝとこ一割かそこらしか吸収せんと思うがな。もし全部有効に吸収するとしたら、胆汁と膵液をよっぽど活性化させるホルモンと一緒に入ってるんちゃうか。20世紀に鉄骨飲料ちゅうのがえろう流行ったことがあってな、ほんとに嘘か知らんけど一本飲んだらベキベキと骨が鳴るほど強くなるような気いしたちゅうで。せやけど毎度300ミリも鉄とったら、鉄糞は出るわ腹は真っ黒になるわで、そらえらいこっちゃで。アッハハハ…」

備田の話は結局要領を得なかったが、ホルモンの力かりて有機化し吸収できそうなことは推測できた。そう云えば妻が一人息子の小晴人に「最近食欲が落ちているようだからこれを飲みなさい。」と何か茶色の液を飲ませてたが、聞くと血を浄化して元気になる薬だと云っていた。これも鉄が入っているのだろう、と思う。

軌道に乗りかけた太陽電池のことから離れて、鋼太郎は暫く鉄有機化に思いを馳せた。体内に入った鉄は血液の浄化に大きな役割を果たすが臓器や血管の強化はできないものか。体内組織に同化して、弱くなった血管や肺、胃腸などの劣化老化している部分と置換し補強できるなら大がかりな手術も要らず薬漬けもない。人工心肺や人工臓器の比ではなくなる。たゞ臓器は生きた細胞が構成しているのに対し「鉄」という

細胞生命体ではない無機質のものにどうやって生命を与えようか。既にかなり高度なロボットが出現しているが、これは心臓に超小型原子炉、脳に人工頭脳、眼耳に高性能カメラやイヤホン、そして筋肉には機能性モータや超高張力ワイヤを使っている。20世紀のSF映画が現実化したに過ぎない。完全な生命体としての鉄はできないか、そうになったら……鋼太郎は無限に埋蔵されている鉄鉱石から、青い芽が生き生きと萌え出て来る情景を思い浮かべ、専門外の生命科学の分野に踏み込もうとしているのに気がついてほろ苦い笑いをもらしていた。

5. ペガサスの勝利

10年の月日が流れた。鋼太郎は現在研究所長の重責を担っている。どんどん若い研究員が入ってくるたびに、彼はペガサス（ニューメタル）の開発に着手した当時の自分を見る思いだった。あれから20年近く経つ。苦労したペガサスは、あの社内発表の日から彼の手を離れいろんな製品となって市場に出て行った。好評だった、というより材料革命と騒がれた。熱狂的に受け入れられた。あらゆる分野で活躍するようになるまでに1年も要しなかった。「^{ペガサス}天馬」…その名の通り縦横に駆け巡り、たくましい翼で堂々と飛翔したのだ。

金銅社長が心の底から笑ったのは、この夢の製品がいかに素晴らしいかを国の内外から評価された時だった。その社長は『人類への最大の贈物』を遺して安らかに永眠した。今度は太陽電池を早く見たい、と鋼太郎に云いつゝ去った。

念願の太陽電池もようやく完成に近い。3年、いや5年と自らに課した期限より遅れたが効率25%、コストはアモルファスシリコンの半分以上という画期的なものができた。まだまだ改良の余地は残されているが、この開発にペガサスの技術がどんなに役立ったことか、鋼太郎は陰に陽に支援してくれた亡き金銅社長にあらためて厚い感謝を捧げた。

静かな秋の夜だった。鋼太郎は孤りグラスを傾けながら過ぎた日への懐いに耽っていた。自分たちは今地震の揺れを怖れないビルで働き、超電導の輸送機関を利用し、軽くて強い住宅に住み、豊富な電力で満ち足りた暮らしをしている。これらの基盤にペガサスがある、と鋼太郎は技術者としての誇りを覚えた。前世紀には戦争という愚行が横行し「鉄」は無駄に消耗され赤い錆となって朽ち果てたそう。だが今はみんなが豊かさの中にあって人としての尊厳を守っている。ニューメタル・ペガサスは遂に人類を至福の境地に導いた。貧困に勝ったのだ。恐怖に勝利したのだ。21世紀も半ばを過ぎて豊かさや安定の入口にやっと立てた。心豊かなこの世を子々孫々に伝えるのが私たちに与えられた使命なのだ。

鋼太郎は窓辺に寄り空を見上げた。ほろ酔いの目に無数の星が燦めいて映る。ひととき輝く星の向こうに亡き金銅社長の笑顔があった。

▶ HSLA Steels'95 第3回国際会議に出席して ◀

長野工業高等専門学校 長坂 明彦

1995年10月25日から10月29日までの5日間にわたり、“HSLA Steels '95, The Third International Conference on High Strength Low Alloy Steels (HSLA鋼'95 高強度低合金鋼の第3回国際会議)”が中国金属学会(CSM)主催により、北京市内北西部の北京動物園にほど近い北京友誼賓館(Beijing Friendship Hotel)にて開催された。このホテルは1954年に建てられ、敷地33万5千㎡、建築面積32万㎡、1900室という中国らしく雄大で趣があり、国際会議会場としてはこの上もなく素晴らしい所であった。また、成田空港から北京首都空港間のフライト時間は約4時間で、時差は日本より1時間遅れであったことが私にとっては時差ボケもなく、誠にありがたかった。私は事前にタクシー(空港とホテル間の往復)と2人部屋宿泊をCSMに予約しておいたが、空港で予約したはずのタクシー業者に行き会えなかった。偶然、信州大学の留学生から中国の家族に荷物を依頼され、結果的に空港で待ち合わせたため、帰宅がてらホテルに寄ってもらってのスタートとなった。私自身中国へは今回で3回目であり、夏と冬を垣間見てきただけに秋の中国には興味津々であった。とにかく市内の道路が整備され、自動車の台数と高級車の増加に驚かされた。その後チェックインしてみると、同室になった人物は、34歳のチェコの民間研究員であった。彼の国では第2外国語が英語であった。馬が合ったせいか、会議中の行動はほぼ一緒であった。彼はホテル内の食事が高いことなどからお金を有効的に利用しており、ホテル周辺の商店から果物を含めた食料を買い込んでいた。私も彼を見習って買い込んだ。通貨は人民幣が使用できるようになり、二重為替制度(約3年前に来た時は兌換券であった)が廃止され、どこでも気楽に買物ができ、気分転換にもなり大変助かった。北京市内の物価は空港使用料などから比較して、日本の約1/2～1/3であった。

今回の会議全体への参加者はその一覧表から142名、参加国は19か国でその内訳は、オーストラリア(2)、オーストリア(1)、ブラジル(3)、カナダ(1)、チェコ(1)、フィンランド(3)、フランス(2)、ドイツ(4)、インド(4)、韓国(6)、ニュージーランド(1)、ルーマニア(1)、ロシア(1)、スペイン(3)、タイ(3)、イギリス(4)、アメリカ(5)、中国(91)そして日本(6)であった。最終プログラムから招待講演14件、一般講演68件の計82件であった。ちなみにこの会議の沿革は、第1回は1985年、第2回は1990年に続く3回目となり、5年毎に北京市にてそれぞれ開催されてきている。

会議は25日は参加登録、26日は午前9時からオープニングセレモニーが始まり、引続き午前中3件、午後1時45分から6件の招待講演が催された。夕方はレセプションが中華料理バイキング形式により盛大に催された。また27日は、午前8時30分から午前一杯まで5件の招待講演があり、日本からは両日で2件あり、荒木透先生と武智弘先生(福岡工業大学)がそれぞれ御講演され、その後の質疑で活発な討論をされた。そして、午後1時45分から“HSLA鋼のミクロ合金元素の挙動”、“冶金プロセス”、“腐食と機械的性質”の3会場に別れての平行セッションに移行した。各会場において計30件の一般講演が15分発表の5分質疑討論という形式で進行した。また、午後7時30分から北京美猴王京劇芸術団による中国オペラ“西游記”が催された。

28日も午前8時30分から“再結晶と組織”、“薄板・帯板・厚板”について2会場で、午後1時45分から“相変態・組織と特性”、“溶接性と多方面”の計38件が一般講演された。私は、28日のコーヒープレイク後の午後4時過ぎに“Warm Stretch-Flangeability of High-Strength TRIP-Aided Dual-Phase Sheet Steels”について口頭発表した。OHPシートは係の方がサポートして下さり、時間節約につながった。予定通り約15分の発表後に2本の質疑を頂けた。しかしその質問に対して十分な解答ができず、チェアマンの武智先生に支援して頂いた。そして何よりも、発表後の拍手が嬉しかった。夕方のバンケットは盛大にして和やかに催された。円卓での中華料理は北京ダックまでのフルコースであった。各国が唄を歌うことになり、トップバッターはカラオケの元祖である日本が御指名され、武智先生御夫妻が『さくら』を日本語で御披露して下さいました。

最終日の29日はバス1台に乗り込み、見学会に参加した。中国北京北郊工芸美術厂(工場)、万里の長城、明の十三陵の順に移動した。今回で2度目の万里の長城を登ることになった。登りはじめて右と左に分かれるコースがあるが、前回は右側の一般コースであったので、同室のチェコ人を誘って、今回は左側の急登・長時間コースを選択した。最終地点まで行ってみると、その先は崩壊していた。少々寒かったが、天気も良く周りの景色も紅葉しており、発表から解放され最高の気分であった。

最後に、第25回日向方学術振興交付金の援助を頂き本国際会議に参加できたことを、日本鉄鋼協会ならびに関係者各位に深く感謝すると共に、本発表に際し終始温かく御指導頂いた信州大学工学部生産システム工学科教授・小林光征先生、助教授・杉本公一先生ならびに(株)神戸製鋼所の白沢省吾博士、橋本俊一博士に併せてお礼申し上げる次第です。(1995年12月26日受付)

次号目次案内

ふえらむ Vol.1 (1996) No.5掲載記事

情報を記録する IRON&STEEL

話題のプロダクツ

PHS

鉄の絶景—静岡編

展望

これからの科学技術行政—科学技術基本法の目指すところ—

野崎雅稔 (科学技術庁)

入門講座

鉄鋼材料編—5 鉄の物性と機能 (物理的性質)

藤田英一 (静岡理科大学)

鉄の歴史④

朽ち果てぬ鉄に魅せられて、古代鉄を探る

井垣謙三 (東北大学名誉教授)

解説

薄板圧延

藤田文夫 (NKK)

製鋼プロセスへの数値解析技術の適用

三宅俊也 ((株) 神戸製鋼所)

現場技術報告

コークス炉ガス液の高度処理技術

東忠幸、他 (新日本製鐵 (株))

製鋼使用済耐火物リサイクル技術の開発

天野肇、他 (大同特殊鋼 (株))

懸賞作文入賞作品紹介⑤

1部 (中学・高校生の部) 3等賞 「カイロにみる鉄の未来」

水野亜紀

2部 (大学生・一般の部) 3等賞 「西暦2045年秋—夢のあとさき」

遠山晃

*掲載記事及び題目は変更になる場合があります。

本会情報一覧

N頁の行事は「鉄と鋼」Vol.81 (1995) の該当号をご参照下さい。

記事内容	掲載号
鉄鋼研究振興資金による第6回助成テーマの募集	本号 299頁
会員名簿代金自動振替のお知らせ	本号 299頁
「日向方斉メモリアル国際会議」助成事業のご案内	本号 300頁
平成8年度重点研究募集要領	本号 301頁
計測・制御・システム工学部会シンポジウム「鉄鋼業における信頼性と設備診断技術」開催案内	本号 301頁
創形創質工学部会 鋼構造物工学フォーラムへのお誘い	本号 302頁
学術雑誌目次速報データベースご利用のお知らせ	本号 302頁
第161・162回西山記念技術講座「鉄鋼とチタンの組織制御技術—極限性能をめざして—」開催案内	本号 305頁
第32回白石記念講座「これからの品質保証」開催案内	本号 306頁
理事、監事、評議員候補者一覧	3号 212頁
新名誉会員および受賞者のお知らせ	3号 213頁
第2回「外国人博士研究員」の募集案内	3号 214頁
第22回鉄鋼工学セミナー受講者募集案内	3号 217頁
定款改正のお知らせ	2号 147頁
第1回 (1995年度) 遊休研究設備紹介事業のご案内	2号 147頁
会費等の自動払込制度ご利用のお願い	1号 66頁
鉄鋼研究振興資金による第5回助成テーマの選定結果	1号 67頁
入会案内	1号 73頁
第1回世界製鋼会議 (ICS'96) 開催案内	12号N605頁
鉄鋼技術用語辞書と機械翻訳サービス案内	12号N610頁
会員異動・変更連絡のお願い	12号 巻末

編集後記

「ふえらむ」の第1号を手にして、鉄鋼協会の新しい会報が生まれる時に編集委員会に参加できたことを喜んでいました。編集の仕事に充分貢献できなかったことを反省し、他の編集委員の皆様大変お世話になったことに感謝します。

会報の編集の仕事について正直言って認識不足で軽く引き受けてしまいましたが、新しく会報を作るにはその基本姿勢の討論から始まって、連載の企画や記事の依頼など多くの仕事が休み無く押し寄せてきて、その大変さを痛感しました。

多くの方々の御協力で会報ができあがっていることが良く分かりました。

記事の執筆をお願いしたメキシコに赴任された方、着任される前に原稿依頼の方が先に届いてすみませんでした。国立の考古学研究所にいる同級生、20年ぶりに連絡とったけれど鉄の歴史の記事頼みますよ。今後も読んでいただく価値のある会報にすべく努力してまいります。御支援下さい。

(M.U.)

会報編集委員会 (五十音順)

委員長 阿部 光延 (新日本製鐵 (株))

副委員長 雀部 実 (千葉工業大学)

委員 石井 邦宜 (北海道大学)	石井 満男 (新日本製鐵 (株))	内村 良治 ((社) 日本鉄鋼協会)
梅本 実 (豊橋技術科学大学)	川田 豊 ((株) 神戸製鋼所)	小林 正人 ((社) 日本鉄鋼連盟)
近藤 隆明 (NKK)	佐藤 駿 (住友金属工業 (株))	下川 成海 ((社) 日本鉄鋼協会)
杉山 香里 ((株) ニューマーケット)	友田 陽 (茨城大学)	中村小夜子 ((社) 日本鉄鋼協会)
久松 定興 (いすゞ自動車 (株))	古田 修 (愛知製鋼 (株))	三宅 苞 (川崎製鉄 (株))
柳 謙一 (三菱重工業 (株))	山口 周 (名古屋工業大学)	

連絡先

本部事務局 〒100 東京都千代田区大手町1-9-4 経団連会館3階

TEL: 総合企画事務局: 03-3279-6021 (代)

学会部門事務局: 03-3279-6022 (代)

生産技術部門事務局: 03-3279-6023 (代)

FAX: 03-3245-1355 (共通)

ふえらむ (日本鉄鋼協会会報) 定価 2,000円 (消費税本会負担)

Bulletin of The Iron and Steel Institute of Japan Price: ¥2,000 (Free of seamail charge)

1996年4月1日印刷納本・発行 (毎月1回1日発行)

編集兼発行人 東京都千代田区大手町1-9-4 経団連会館内 島田 仁

印刷人/印刷所 東京都新宿区三栄町20-3(新光オフィソーム) (株) ニューマーケット

発行所 社団法人日本鉄鋼協会 〒100 東京都千代田区大手町1-9-4 経団連会館3階

TEL: 総合企画事務局: 03-3279-6021 (代)

学会部門事務局: 03-3279-6022 (代)

生産技術部門事務局: 03-3279-6023 (代)

FAX: 03-3245-1355 (共通)

郵便振替 口座東京00170-4-193 番 (会員の購読料は会費に含む)

© COPYRIGHT 1996 社団法人日本鉄鋼協会

複写される方に

本誌に掲載された著作物を複写する場合は、本会が複写権を委託している次の団体に許諾を受けて下さい。

学協会著作権協議会

〒107 東京都港区赤坂9-6-41 社団法人日本工学会内 TEL 03-3475-4621 FAX 03-3403-1738

また、本会は上記団体を通じて米国Copyright Clearance Center, Inc.と、また本会独自に米国Institute for Scientific Informationと複写権に関する協定を結び、双方に本誌を登録しています。従って、米国において本誌を複写される場合は、次のいずれかの機関の指示に従って下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.

222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA TEL 001-1-508-750-8400 FAX 001-1-508-750-4744

Institute for Scientific Information

3501 Market Street Philadelphia, PA 19104 USA TEL 001-1-215-386-0100 FAX 001-1-215-386-6362

行事等予定

太字は本会主催の行事。N頁の行事は「鉄と鋼」Vol.81(1995)の該当号をご参照下さい。

開催期日	行事(開催地)	締切	掲載号及び頁
1996年			
4月 11,12日	レーザ加工国際フォーラム'96 (大阪)		3号 224頁
18,19日	第6回電子顕微鏡大学 (東京)	1996-4-5	2号 160頁
22~24日	第1回世界製鋼会議 (ICS'96) (千葉)	1995-4-28	12号 N605頁
5月 10日	第169回塑性加工シンポジウム 「冷間鍛造：精度はどこまであげられるか」(名古屋)		3号 224頁
12日	計測・制御・システム工学会シンポジウム 「鉄鋼業における信頼性と設備診断技術」(東海市)		本号 301頁
15~17日	第5回複合材料界面シンポジウム (福岡)	1996-1-12	1号 71頁
15~17日	自動車技術展「人とくるまのテクノロジー展'96」(横浜)		本号 310頁
17日	「工学教育」連合講演会 一産業構造の変革に対応した大学と企業での教育のあり方 (東京)		
21,22日	第161回西山記念技術講座 「鉄鋼とチタンの組織制御技術—極限性能をめざして」(東京)		本号 305頁
22,23日	計測連合シンポジウム 先端計測'96 (東京)		3号 224頁
23日	第71回塑性加工講習会「PL法と塑性加工」(東京)		本号 310頁
28日	鍛造材料の信頼性向上を目指して—材料工学と機械工学の接点を探る (名古屋)		3号 224頁
6月 9~12日	SICE夏期セミナー'96「実プラントのモデリングと H_{∞} 制御」(山梨)		本号 310頁
10日	第32回白石記念講座「これからの品質保証」(東京)		本号 306頁
18,19日	第162回西山記念技術講座 「鉄鋼とチタンの組織制御技術—極限性能をめざして」(大阪)		本号 305頁
27,28日	第9回フラクトグラフィシンポジウム (大阪)	1996-1-10	1号 71頁
7月 25,26日	第32回X線材料強度に関するシンポジウム (京都)	1996-4-24	本号 310頁
27~8月2日	第22回鉄鋼工学セミナー (蔵王)	1996-5-10	3号 217頁
29日~31日	第15回混相流シンポジウム'96 (福井)	1996-4-12	3号 224頁
30日	第44回年次大会「工学・工業教育に関する研究」(広島)	1996-3-11	2号 160頁
30~8月1日	第27回結晶成長国内会議 (滋賀)	1996-4-30	本号 310頁
8月 21~24日	第3回アジア太平洋塑性工学の進歩とその応用に関する国際会議 (AEPA'96) (広島)		1号 71頁
28,29日	平成8年度技術士試験「技術士法に基づく技術士第2次試験」(全国9都市)	1996-4-5	2号 155頁
9月 28~30日	第132回秋季講演大会 (札幌)		
10月 8,9日	第9回日本・ドイツセミナー (デュッセルドルフ)		
13日	平成8年度技術士第1次試験「技術士法に基づく技術士補になるための試験」 (全国9都市)	1996-5-17	本号 309頁
21~24日	第4回傾斜機能材料国際シンポジウム(FGM'96) (つくば)		2号 160頁
22~24日	7th International Symposium on Physical Simulation (つくば)	1996-4-1	1号 68頁
27~30日	2nd International Symposium on Extraction and Processing for the Treatment and Minimization of Wastes (Arizona,USA)		1号 76頁
11月 18~20日	第2回エコバランス国際会議 (つくば)	1996-3-31	3号 224頁
12月 5~7日	International Welding Conference 1996 IWC-96 (Bombay,India)	1996-4-30	本号 310頁
9~11日	第3回環太平洋国際会議「鍛造凝固プロセスのモデリング」(北京)	1996-4-1	3号 224頁
1997年			
1月 4~8日	5th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts' 97 (Sydney, Australia)	1996-3-15	2号 154頁
3月 27~29日	第133回春季講演大会 (東京)		
7月 7~11日	International Conference on Thermomechanical Processing of Steels and Other Materials (Wollongong, Australia)		1号 71頁
14~17日	Australasia-Pacific Forum on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials (Sydney, Australia)		2号 160頁

ふらむ Vol.1 No.4 広告目次

表2 丸本工業株 試料準備機器

前1 住友金属テクノロジー株

試験分析サービス

2 株堀場製作所

炭素硫黄分析装置

後1 本誌広告目次

大和製罐株

総合容器メーカー

2 株CRC総合研究所 熱力学計算ソフト

後2 株協会通信社 広告案内

表3 日本アナリスト株 分析装置

表4 株トライメート スラブ切断装置他

本誌広告取扱 **株協会通信社** 〒104 東京都中央区銀座7丁目3番13号
TEL 03(3571)8291・FAX 03(3574)1467

世界の新技术をリードする総合容器メーカー



◇世界ではじめて開発した
スチール製2ピース缶

◇市場への導入に成功した
飲料用・缶詰用溶接缶



大和製罐株式会社

本社 〒103 東京都中央区日本橋2-1-10 ☎東京 03(3272)0561

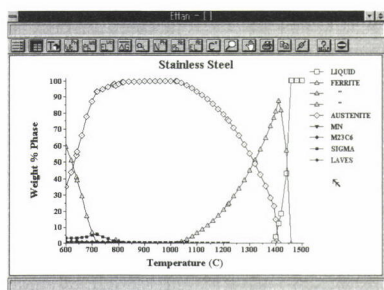
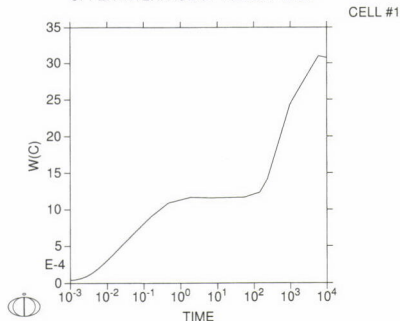
開発元
スウェーデン
KTH

統合型熱力学計算ソフトウェア

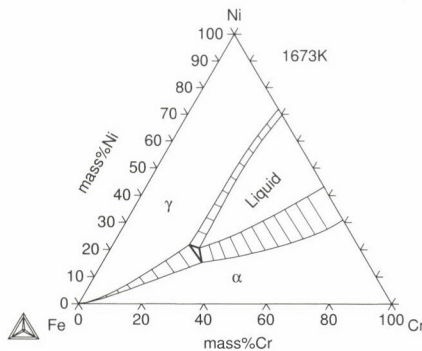
未来設計企業
CRC

Thermo-Calc™

DICTRA (1995-10-15:17.27.24) :Growth of M23C6 in a Austenite
UPPER INTERFACE OF REGION "LAST"



- 平衡計算、状態図計算、凝固シミュレーション等
- SGTEデータベース、Ti基、Ni基、Al基データベース等



稼動コンピュータ

- ・UNIX ワークステーション
- ・パソコン DOS/V

関連ソフトウェア

- ・拡散律速型変態計算ソフト
DICTRA
- ・パソコン版Windowsソフト
ETTAN

お問合せ先

日本総代理店

株式会社 **CRC総合研究所** 科学システム事業部

〒136 東京都江東区南砂2-7-5

TEL: 03-5634-5809 FAX: 03-5634-7338

*Please allow us to advertise
your excellent products and technology.*

ふえらむ

ferrum

Bulletin of The Iron and Steel Institute of Japan

Monthly.

Circulation: 11,000 Copies. Written in Japanese.

鉄と鋼

TETSU-TO-HAGANE

Monthly.

Circulation: 3,000 Copies. Written in Japanese.

ISIJ International

ISIJ International

Monthly.

Circulation: 5,500 Copies. Written in English.

日本鉄鋼協会講演論文集

材料とプロセス

Report of the ISIJ Meeting

Current Advances in Materials and Processes

Spring: No. 1, 2, 3. Autumn: No. 4, 5, 6.

Circulation: 3,000 Copies each. Written in Japanese.

For more Information,
Write or Facsimile.

ADVERTISING AGENCY for
The Iron and Steel Institute of Japan
KYOKAITSUSHINSHA CO., LTD.

3-13, GINZA 7 CHOME CHUO-KU,
TOKYO 104 JAPAN
Tel. 03-3571-8291 • Fax. 03-3574-1467

——ルーチン分析用 簡易型——

金属中炭素・イオウ 同時分析装置
LECO CS-300

高い信頼性を保ちながらも
贅肉を落とした簡易型です



CS-300型金属中炭素・イオウ同時分析装置

■高周波燃烧、赤外吸収型検出器 ■分析所要時間30~40秒

18MHz、2.2kWの高周波燃烧炉及びソリッドステート型赤外線検出器を採用。

高度なコンピュータテクノロジーを駆使して、ユーザーに親切な操作システムと簡単さを実現しました。

日常分析のみに焦点を合わせ、無駄を省いて経済性を優先、C・Sルーチン分析の必要充分条件を備えた熟練不要の普及型です。

特に高度な分析精度は求めず、分析件数も余り多くないユーザーに最適です。

常設展示中 ユーザーご自身の手でテストしてください。



日本総代理店
LECO CORPORATION
U.S.A.

日本アナリット株式会社



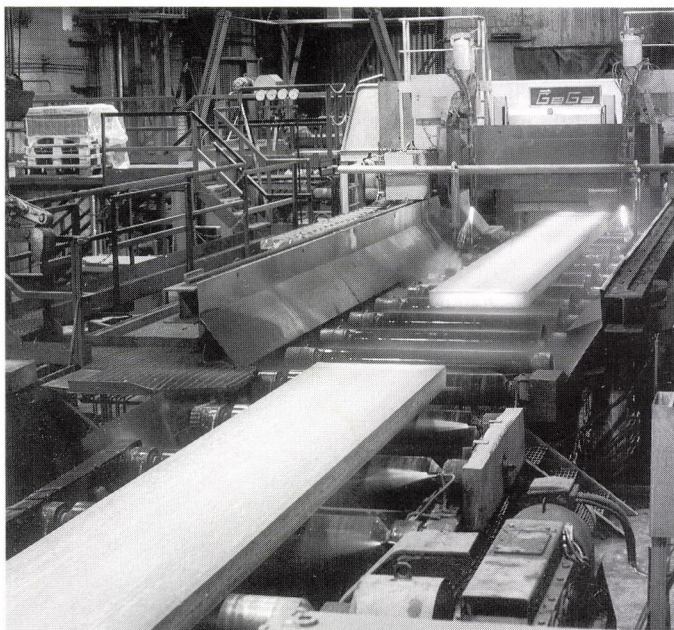
ISO-9002
No. FM 24045

(BSI - British Standards Institute)

本社 〒141 東京都品川区西五反田 3-9-23 ☎(03)3493-7281代 FAX(03)5496-7935
大阪支店 〒560 大阪府豊中市岡上の町 2-6-7 ☎(06) 849-7466 FAX(06) 842-2260
九州営業所 〒804 北九州市戸畑区汐井町1-1(戸畑ステーションビル) ☎(093)884-0309 FAX(093)873-1190

ドイツのアイディアで、先進技術の日本にも貢献を!

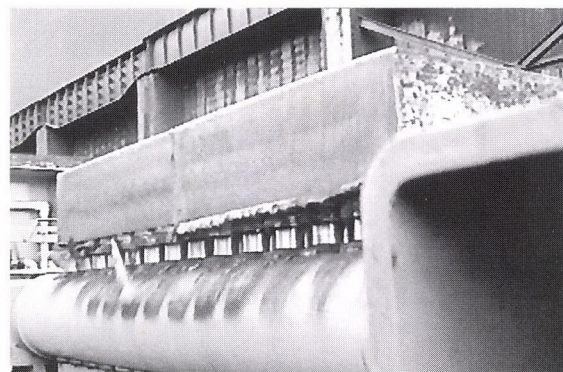
GeGa



最新型 GBM スラブ切断装置

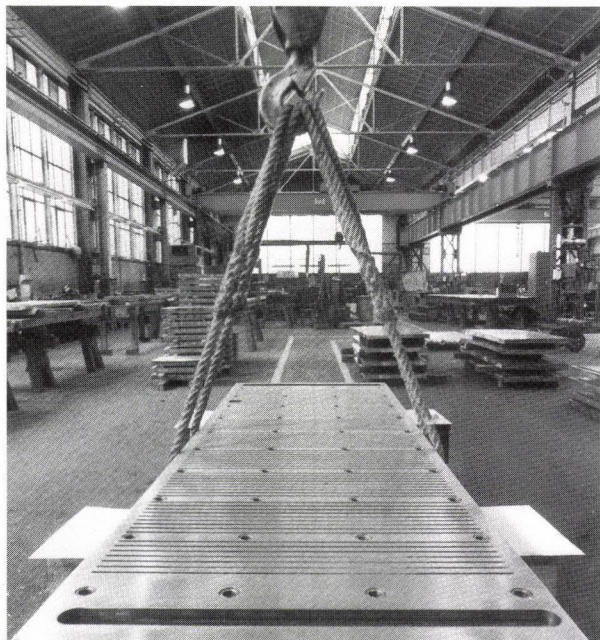
連続鋳造用ガス切断装置として、ブルーム／ビレット用で910台、スラブ用で380台、幅分割用で140台などなどの納入実績を有するドイツのゲガロツ社は、常に最新の技術で世界の製鉄製鋼業界のご要望に対応しております。

さらに機械方式によるバリ除去装置も開発し、好評を得ております。このバリ除去装置は、多数の刃型ナイフにより、鋳片端面に付着しているバリをきれいに除去します。しかもバリ除去の際、粉塵や騒音などは発生しません。これらの点でも、良好な作業環境の維持に寄与しております。



新たに開発した機械式ノロ除去装置

KME



スラブ用モールドプレート

用途に応じて、KMヨーロッパメタルは最適な素材で製品を提供いたします。以下にそれぞれの素材の特性を示します。

素 材 の 種 類			脱 酸 銅	銀入り銅	特殊合金銅(ELBRODUR)		
諸 特 性		単 位	DHP-Cu	DPS-Cu	G(CuCrZr)	BN(CuCo/NiBe)	
化学組成		%	Cu 99.9 P 0.03	Ag 0.09 P 0.006 Cu 残	Cr 0.65 Zr 0.10 Cu 残	Co 3.0 Be 0.15 Zr 0.15 Cu 残	
物理的 特性	電 導 性	m / Ω mm ²	48	55	47	35	
	熱 伝 導 性	% IACS	83	95	81	53	
	熱膨張係数 (20-300℃)	W / m ・ K	322	370	315	233	
	再結晶温度	10 ⁻⁶ / K	17.7	17.7	18	17	
	半軟化温度	℃	350	370	700	(720)	
	弾 性 率	℃			500	520	
		10 ³ N/mm ²	120	125	128	138	
機 械 的 特 性		温度(℃)	単 位				
	0.2 % 耐 応 力 (Rp0.2)	20	N / mm ²	265	265	300	570
		200		235	235	280	560
		350		(190)	(190)	240	540
		500		(30)	(30)	165	430
	抗張力 (Rm)	20	N / mm ²	275	275	410	750
		200		240	240	380	710
		350		(195)	(195)	320	650
		500		(90)	(90)	200	460
	伸縮率 (A5)	20	%	25	15	18	17
200		9		9	17	12	
350		(10)		(10)	19	8	
500		(40)		(40)	20	5	
硬 度 (HB2.5 62.5)	20		85	90	125	200	
用 途			チューブ	チューブおよびプレート			

GeGaおよびKM Europa Metal製品についてのお問い合わせは：



株式会社 **トライメート**

〒194 東京都町田市旭町1-6-11 コスモ・ミツイ
PHONE:0427-27-2813 TELEFAX:0427-23-0803